



Уральский
федеральный
университет

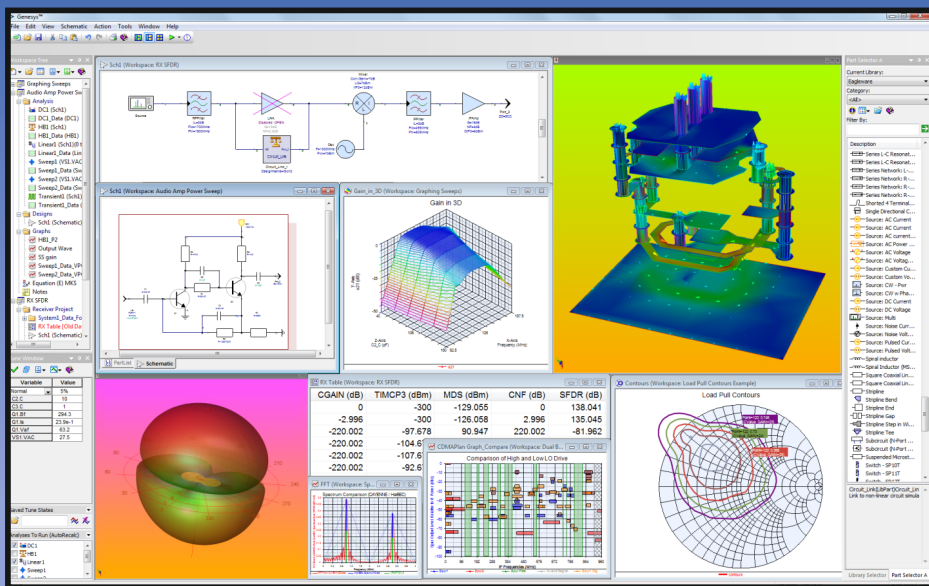
имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Институт радиоэлектроники
и информационных
технологий — РТФ

Б. В. ГУСЕВ
Е. В. ЛАГУНОВ
В. А. ЧЕЧЁТКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ В СРЕДЕ GENESYS

Учебно-методическое пособие



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Б. В. Гусев, Е. В. Лагунов, В. А. Чечёткин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ В СРЕДЕ GENESYS

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета для студентов вуза,
обучающихся по направлению 11.03.01 — Радиотехника

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2020

УДК 004.94:621.38(075.8)
ББК 30в6я73+32.965-01я73
Г96

Рецензенты:

М. С. Мухамедзянов, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизи-
рованной механики и связи на железнодорожном транспорте УрГУПС;
кафедра ОПД-ТС Уральского технического института связи и инфор-
матики (филиал) «Сибирский государственный университет теле-
коммуникаций и информатики» (завкафедрой канд. техн. наук, доц.
Н. В. Будылдина)

Научный редактор — д-р техн. наук, проф. *С. Н. Шабунин*

Изображение на обложку предоставлено компанией Keysight Technologies

Гусев, Б. В.

Г96 Моделирование электронных схем в среде GENESYS : учебно-
методическое пособие / Б. В. Гусев, Е. В. Лагунов, В. А. Чечёткин ;
Мин-во науки и высшего образования РФ. — Екатеринбург :
Изд-во Урал. ун-та, 2020. — 104 с.

ISBN 978-5-7996-3010-2

Учебно-методическое пособие содержит основные сведения по моделированию
электронных схем с использованием САПР Genesys компании Keysight Technologies.
Приведено краткое ознакомление с программой и описаны основные этапы проек-
тирования фильтров, автогенератора, умножителя частоты и возбуждателя частоты.

Библиогр. 8. Табл. 2. Рис. 120. Прил. 4.

УДК 004.94:621.38(075.8)
ББК 30в6я73+32.965-01я73

ISBN 978-5-7996-3010-2

© Уральский федеральный
университет, 2020

Оглавление

Предисловие	5
1. Изучение среды Genesys	7
1.1. Ознакомление с программой (на примере разработки дисплексера)	9
1.2. Создание схемы фильтра нижних частот	11
1.3. Анализ схемы фильтра нижних частот	16
1.4. Создание и анализ схемы фильтра верхних частот.....	20
1.5. Создание и анализ диплексера	22
1.6. Оптимизация схемы диплексера	24
1.6. Контрольные вопросы	33
2. Разработка автогенератора	34
2.1. Определение параметров транзистора	35
2.2. Расчет автогенератора по постоянному току	42
2.3. Расчет автогенератора по переменному току	48
2.4. Энергетический расчет автогенератора.....	53
2.5. Анализ схемы автогенератора.....	55
2.6. Контрольные вопросы	64
3. Разработка умножителя частоты	65
3.1. Определение входных данных умножителя	66
3.2. Расчет коллекторной цепи умножителя.....	68
3.3. Расчет входной цепи умножителя	72
3.4. Создание схемы умножителя.....	73

3.5. Анализ схемы умножителя.....	75
3.6. Контрольные вопросы	77
4. Проектирование возбудителя частоты	78
4.1. Разработка схемы возбудителя частоты	79
4.2. Разработка полосового фильтра	80
4.3. Разработка печатной платы возбудителя	86
4.4. Контрольные вопросы	90
Список библиографических ссылок	91
Словарь	92
Приложение 1. Варианты данных для расчета и содержание отчетов исследования	95
Приложение 2. Пример выражений расчетов автогенератора	98
Приложение 3. Извлечение данных входного сигнала умножителя	100
Приложение 4. Пример выражений расчетов удвоителя	101

Предисловие

Одним из популярных программных продуктов, используемых для проектирования радиочастотных устройств, является проприетарная система автоматизированного проектирования Genesys компании Keysight Technologies [1]. Она представляет собой высокопроизводительное средство проектирования, предназначенное для разработчиков ВЧ и СВЧ плат и модулей.

Среда компьютерного моделирования Genesys позволяет создавать схемы, состоящие из сосредоточенных и распределенных элементов радиоэлектронных схем. При создании схем могут использоваться встроенные мастера для фильтров, смесителей, генераторов и др. Программа позволяет исследовать проектируемое устройство различными методами и вывести результат в нескольких графических формах.

Большими достоинствами САПР являются ее относительно низкая цена и наличие русскоязычного интерфейса. Используя встроенный язык программирования можно автоматически пересчитывать элементы разрабатываемых устройств и оценивать получаемые изменения.

Загрузить последнюю версию программы можно с сайта разработчика [1]. Программа платная, есть демонстрационная версия и специальная лицензия для образовательных учреждений. Торговое название последней версии: PathWave RF Synthesis. Типовые требования для установки: Windows 7...10 (64-bit), 10 ГБ на жестком диске, 6 ГБ оперативной памяти.

Пособие предназначено для ознакомления с методами автоматизированного проектирования высокочастотных устройств, а также для формирования начальных приемов работы с программой на примере разработки автогенератора, умножителя частоты и возбудителя частоты.

В первой главе пособия рассмотрены общие вопросы подготовки к работе с инструментальным средством Genesys, в частности:

- создание схемы простого диплексера;
- линейный анализ схемы;
- оптимизация номиналов элементов для достижения требуемых характеристик.

Во второй главе рассмотрен расчет и анализ кварцевого автогенератора. Исследуется влияние изменения режима работы на качество формируемого сигнала.


В третьей главе рассмотрен расчет и методика проектирования умножителя частоты. Особое внимание уделено вопросам согласования с нагрузкой.

В четвертой главе рассмотрено создание возбуждителя частоты, фильтрация нежелательных гармоник и разработка его конструкции.

При значительных изменениях в новых версиях программы будет подготовлено новое издание пособия.

В рамках обучения студенты Уральского федерального университета выполняют учебные работы, в ходе которых осуществляют разработку автогенератора, умножителя частоты и создание возбуждителя частоты. Данные для выбора и справочные параметры транзисторов представлены в Приложении 1.

1. Изучение среды Genesys

Запустим Genesys двойным щелчком на пиктограмме  либо щелчком по соответствующей строке программы в стартовом меню Windows. После запуска открывается главное окно среды Genesys, показанное на рис. 1.1, где помещены инструменты проектирования радиоэлектронных схем, предоставляемые этой средой проектирования.

При запуске на экране могут отображаться окна приветствия и выбора действий, которые нужно закрыть.

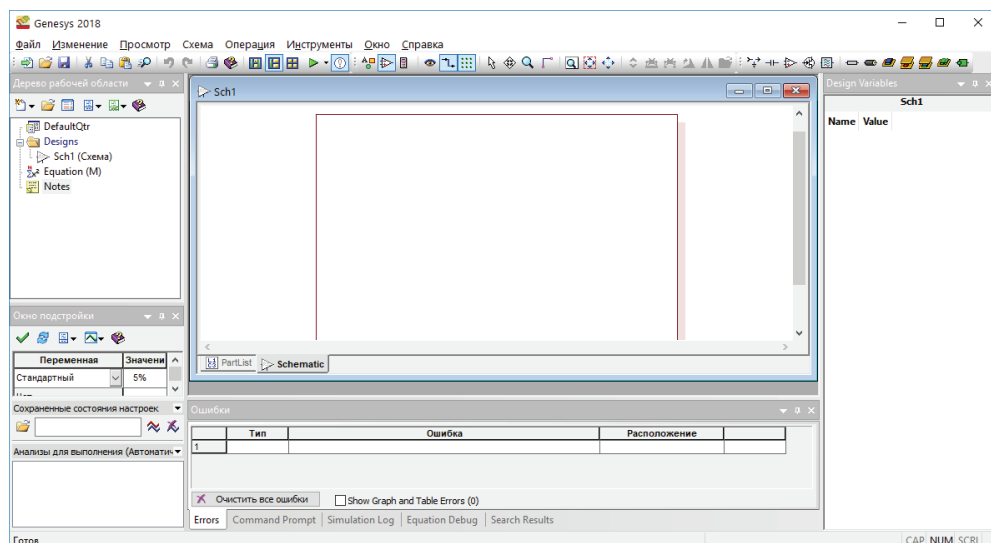


Рис. 1.1. Главное окно Genesys в режиме русского меню

На рис. 1.1 приведено окно в режиме русского меню. Некоторые элементы существующей версии не переведены, поэтому для единообразия описания в дальнейшем будем использовать программу в стандартном режиме (с английским меню), как показано на рис. 1.2. Перевод необходимых терминов приведен в словаре, расположенном в заключительной части пособия (см. с. 92).

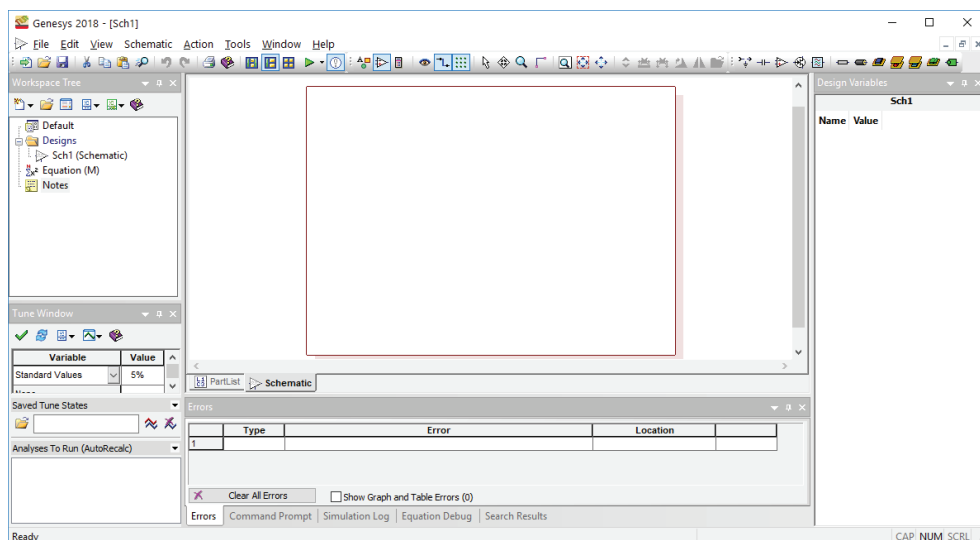


Рис. 1.2. Главное окно Genesys (английское меню)

Главное окно среды проектирования Genesys по вертикали разделено на три части. В левой части содержатся средства управления — дерево рабочей области. Центральную часть окна Genesys занимает рабочее поле. Под ним расположены поля сообщений и ошибок, ввода команд управления. Правую сторону окна занимает панель селектора компонентов.

В верхней части окна расположены главное меню и панели инструментов. Многие функции и команды меню также доступны через панели инструментов и/или дерева рабочей области. Вид и состав меню и панели инструментов динамически изменяются в зависимости от открытого активного окна. Чтобы узнать команду, с которой связан значок на панели инструментов, установим курсор мышки на этот значок и подождем несколько секунд. Появится небольшая подсказка для значка во всплывающем поле.

1.1. Ознакомление с программой (на примере разработки диплексера)

Для ознакомления с программой разработаем простое устройство — диплексер. В соответствии с [2, с. 15] для суммирования в общей нагрузке сигналов нескольких источников (генераторов), работающих в неперекрывающихся частотных диапазонах, используются мультиплексоры. В частности, для суммирования сигналов двух источников используются диплексеры. Взаимной задачей по отношению к задаче суммирования является задача частотного разделения сигналов (каналов). То есть, корректно рассчитанный диплексер может использоваться и для суммирования, и для разделения каналов. Схема такого устройства приведена на рис. 1.3. Диплексер состоит из двух фильтров (Φ_1 и Φ_2), нагруженных каждый на свою нагрузку. Входы фильтров, имеющие входные проводимости Y_{BX1} и Y_{BX2} соответственно, параллельно соединены и подключены к источнику входного сигнала E , формируя общую входную проводимость Y_{BX} .

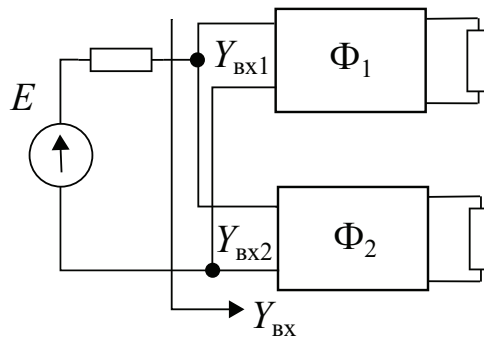


Рис. 1.3. Структурная схема диплексера

При этом должен выполняться ряд требований:

- устранение взаимного влияния каналов (развязка),
- отсутствие потерь мощности при суммировании/разделении,
- обеспечение согласования для каждого источника и нагрузки.

При расчете частотных характеристик диплексеров на параллельно соединенных фильтрах следует учитывать, что входы (выходы) фильтров взаимно шунтируют друг друга, поэтому частотные характеристики каждого из каналов будут отличаться от характеристик фильтров, работающих по отдельности.

Разработаем диплексер для систем кабельного телевидения. В соответствии с ГОСТ 52023–2003 в кабельных сетях «полоса частот от 40 до 1000 МГц предназначена для распределения радиосигналов в прямом направлении, полоса частот от 5 до 30 МГц — для передачи радиосигналов в обратном направлении» [3, с. 1]. В связи с этим для фильтра нижних частот (ФНЧ) требуется частота среза 30 МГц, а для фильтра верхних частот (ФВЧ) — 40 МГц. По рекомендациям О. В. Алексеева, Г. А. Грошева, Г. Г. Чавка [2, с. 15] сделаем частоту среза одинаковой для ФНЧ и ФВЧ и среднегеометрической между 30 и 40 МГц, равной 35 МГц.

Сопровителения нагрузки «для линейной сети, выполненной на коаксиальном кабеле, должны иметь несимметричные входы и выходы номинальным сопротивлением 75 Ом» [3, с. 24].

Для нашего случая, когда фильтры включаются параллельно, первое звено фильтров должно быть последовательным. Поэтому используем Т-образные ФВЧ и ФНЧ Баттерворта, объединив их так, как показано на рис. 1.4.

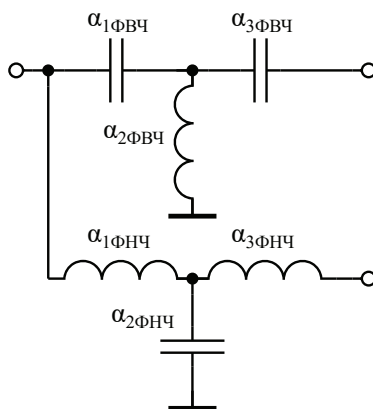


Рис. 1.4. Схема диплексера:

$\alpha_1 \text{ ФВЧ}$, $\alpha_2 \text{ ФВЧ}$, $\alpha_3 \text{ ФВЧ}$ — нормированные значения элементов ФВЧ;

$\alpha_1 \text{ ФНЧ}$, $\alpha_2 \text{ ФНЧ}$, $\alpha_3 \text{ ФНЧ}$ — нормированные значения элементов ФНЧ

Нормированные значения элементов фильтров α_i (рассчитанные для единичных угловой частоты и сопротивления) возьмем из [4, с. 35, табл. П. 1.1]. Для фильтра третьего порядка эти значения следующие:

$$\alpha_{1\text{ФВЧ}} = 1,0, \alpha_{2\text{ФВЧ}} = 0,5, \alpha_{3\text{ФВЧ}} = 1,0,$$

$$\alpha_{1\text{ФНЧ}} = 1,0, \alpha_{2\text{ФНЧ}} = 2,0, \alpha_{3\text{ФНЧ}} = 1,0.$$

Рассчитаем денормированные значения индуктивностей C_i и емкостей L_i для требуемых частоты и нагрузки по формулам:

$$C_i = \frac{\alpha_i}{\omega_{\text{CP}} R}; \quad L_i = \frac{\alpha_i R}{\omega_{\text{CP}}},$$

где α_i — нормированное значение элемента;

ω_{CP} — частота среза фильтра, $\omega_{\text{CP}} = 2\pi f_{\text{CP}}$;

R — сопротивление нагрузки фильтра.

Для частоты 35 МГц и нагрузки 75 Ом получаем следующие значения:

$C_{1\text{ФВЧ}} = 61 \text{ пФ}$, $L_{2\text{ФВЧ}} = 171 \text{ нГн}$, $C_{3\text{ФВЧ}} = 61 \text{ пФ}$,

$L_{1\text{ФНЧ}} = 341 \text{ нГн}$, $C_{2\text{ФНЧ}} = 121 \text{ пФ}$, $L_{3\text{ФНЧ}} = 341 \text{ нГн}$.

Чтобы лучше изучить возможности программы в области моделирования составных схем, создадим отдельные схемы для ФНЧ и ФВЧ, а затем объединим их вместе.

1.2. Создание схемы фильтра нижних частот

Создание схем начнем с ФНЧ. Переименуем автоматически созданную схему Sch1 в LF, вызвав правой клавишей мыши на строке Sch1 в дереве рабочей области всплывающее меню (рис. 1.5) и щелкнув по строке Rename.

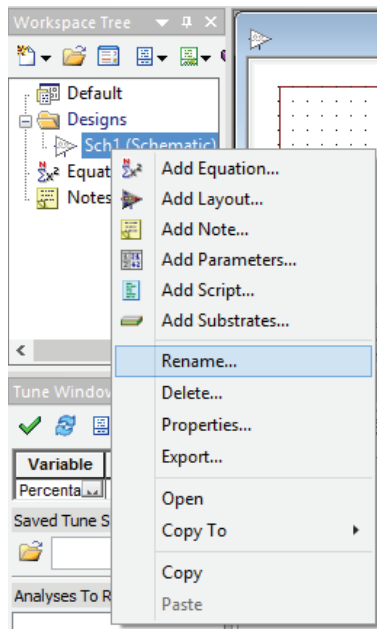


Рис. 1.5. Всплывающее меню дерева рабочей области

Появится окно диалога переименования (рис. 1.6), в котором введем новое название схемы и нажмем кнопку ОК.

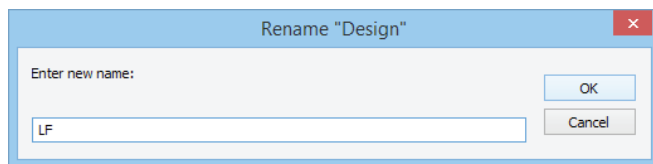



Рис. 1.6. Переименование схемы

Сохраним проект, нажав кнопку Save  на панели инструментов и выбрав каталог и название, например lab1.

Установим элементы на поле схемы, которое сделаем активным, щелкнув по нему. Элементы можно выбрать на панели селектора компонентов, на панелях инструментов или клавишами клавиатуры (наиболее часто используемые). Используем третий способ, нажмем на клавиатуре клавишу **L** и щелкнем в поле схемы. Мы поместили на схему первую индуктивность фильтра так, как показано на рис. 1.7.

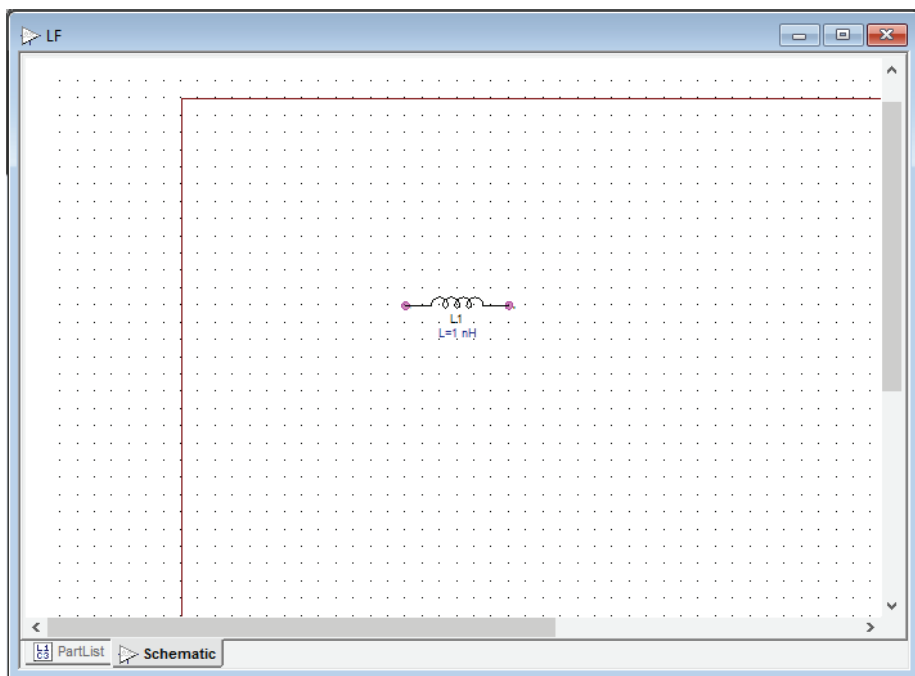


Рис. 1.7. Первый элемент схемы

Размер индуктивности слишком мал, поэтому увеличим масштаб колесиком мыши или клавишей **+** на цифровой клавиатуре. Снова нажмем клавишу **L** и поместим вторую индуктивность рядом с первой. Нажмем клавишу **C** и поместим конденсатор в середине под индуктивностями. Развернем конденсатор, нажав клавишу **F3** так, как показано на рис. 1.8.

Если перед установкой компонента нажать клавишу мыши и сдвинуть курсор, можно ориентировать устанавливаемый компонент вертикально или горизонтально. Если при щелчке удерживать клавишу Shift элемент будет иметь укороченные выводы.

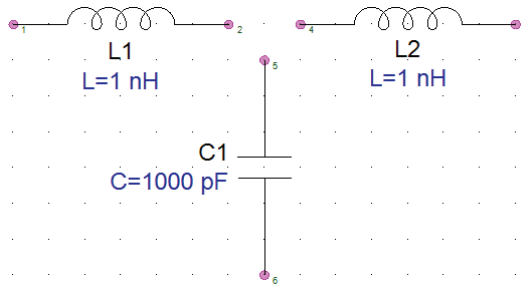


Рис. 1.8. Поворот конденсатора

Добавим на схему входной (клавиша **I**) и выходной порты (клавиша **O**) слева и справа от индуктивностей. Поместим заземление (клавиша **G**) под конденсатором так, как показано на рис. 1.9.

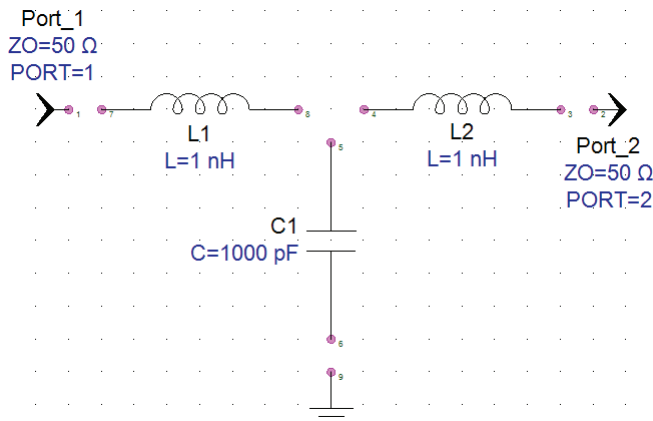


Рис. 1.9. Размещение портов и заземления

Соединим элементы в схему. Подведем курсор мыши к выводу первого элемента и, когда он изменит форму на «стрелку углом», нажмем левую кнопку мыши. Появится «резиновый» проводник, второй конец которого подведем к выводу соединяемого элемента и отпустим кнопку мыши. Можно использовать и второй способ: возьмем элемент за край и, совместив вывод с выводом другого элемента, отпустим его. Сдвинем элемент в прежнюю позицию и увидим, что выводы соединены. После соединения всех элементов получится схема, приведенная на рис. 1.10.

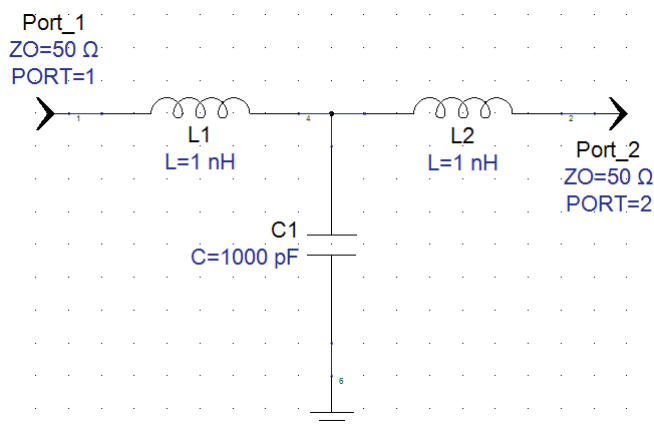


Рис. 1.10. Соединение элементов

Все проводники имеют номера, отображаемые на рисунке. Номера автоматически назначаются программой при добавлении или изменении соединений и могут быть исправлены пользователем.

Отредактируем значения параметров элементов. Дважды щелкнем на входном порту. Откроется окно свойств элемента (рис. 1.11).

Изменим значение сопротивления по умолчанию на требуемое для нашего устройства — 75 Ом, как показано на рис. 1.11. Аналогично изменим сопротивление выходного порта.

Второй метод ввода параметров элементов используем для индуктивностей и емкости. Щелкнем прямо по значению на схеме и введем число в окне параметра (рис. 1.12).

После ввода всех параметров получится схема, изображенная на рис. 1.13.

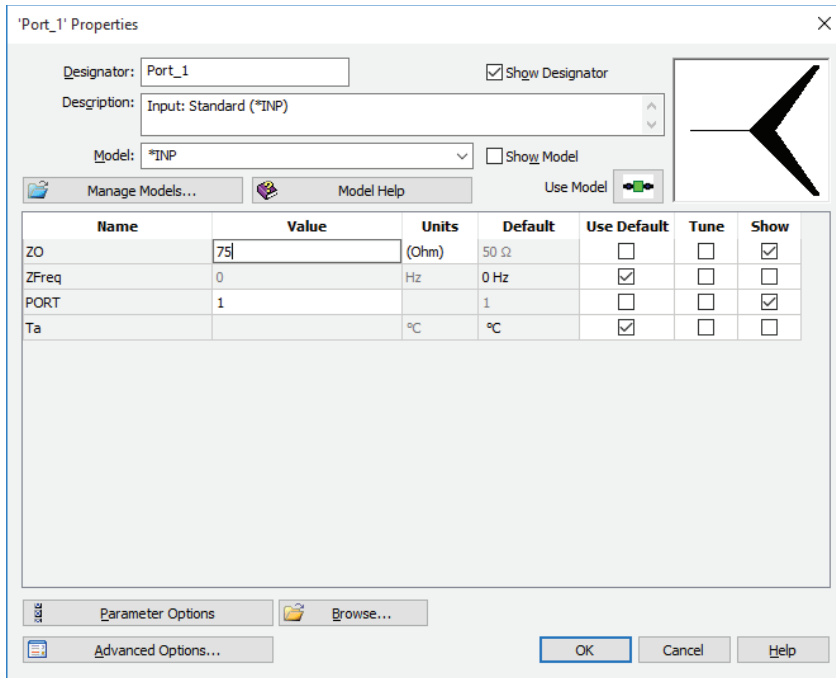


Рис. 1.11. Свойства элемента

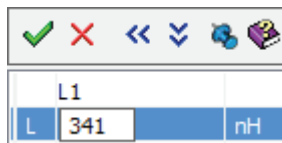


Рис. 1.12. Окно параметра

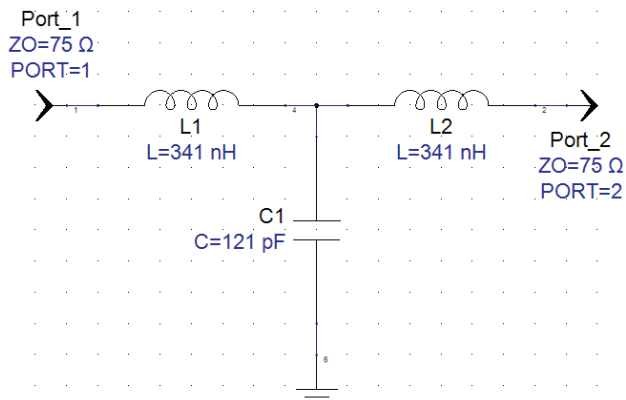



Рис. 1.13. Схема после ввода значений параметров

1.3. Анализ схемы фильтра нижних частот

Запустим анализ схемы, щелкнув зеленый треугольник Run Analysis  на панели инструментов. Появится предупреждение о том, что не создан анализ схемы и предложение о его создании (рис. 1.14).

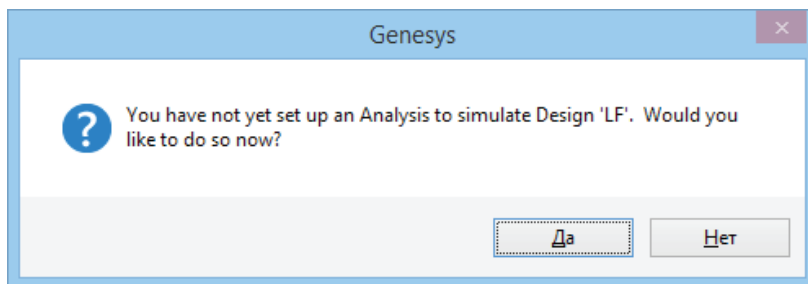


Рис. 1.14. Предложение создания анализа

Нажмем кнопку **Да** в связи с необходимостью анализа в частотной области, выберем тип добавляемого анализа — Linear Analysis так, как показано на рис. 1.15.

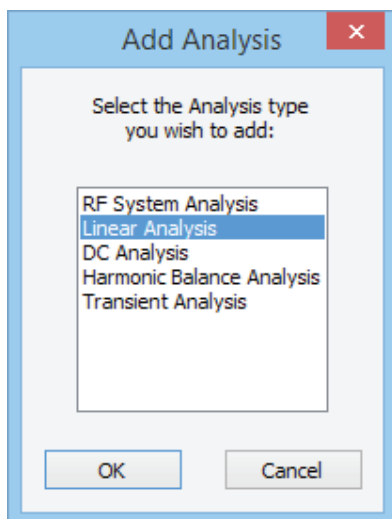


Рис. 1.15. Выбор типа анализа

Появится окно свойств линейного анализа (рис. 1.16).

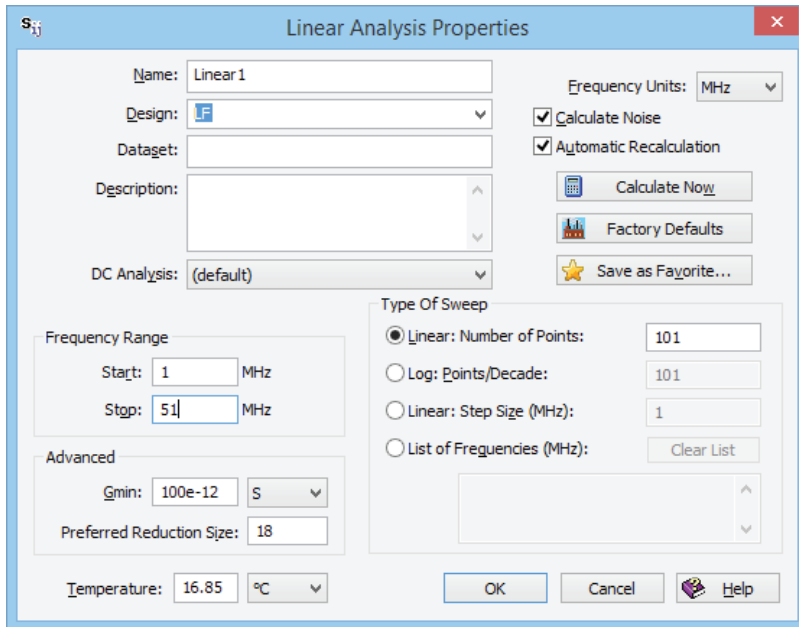


Рис. 1.16. Свойства линейного анализа

Необходимо проанализировать ФНЧ с частотой среза 35 МГц. Для этого изменим значения Frequency Range на 1...51 МГц, как показано на рис. 1.16. Остальные значения оставим по умолчанию. Нажмем кнопку ОК.

Добавим график проходной характеристики S_{21} , щелкнув второй клавишей мыши по выходному порту схемы и выбрав тип графика из всплывающего меню так, как показано на рис. 1.17.

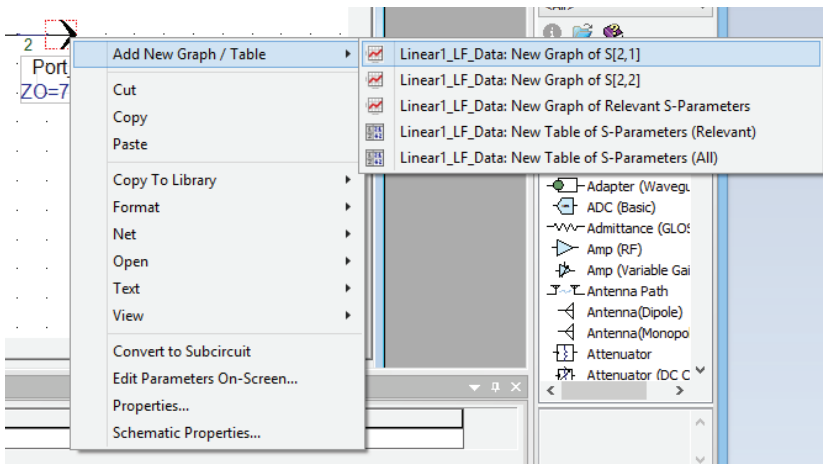


Рис. 1.17. Добавление графика

Получится график коэффициента передачи S_{21} (рис. 1.18). Размер шрифта на графике можно изменять клавишами **Ctrl+Num+** и **Ctrl+Num-**.

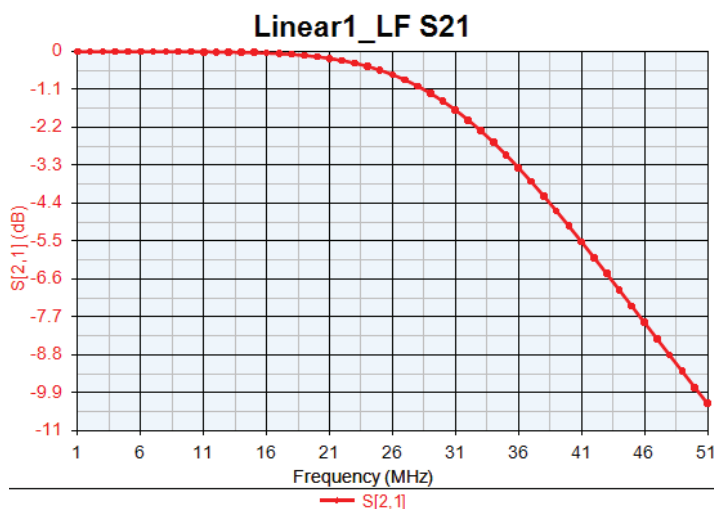


Рис. 1.18. График результатов анализа

Добавим на график коэффициент отражения по входу S_{11} . Для этого дважды щелкнем по графику. Откроется окно свойств графика (рис. 1.19).

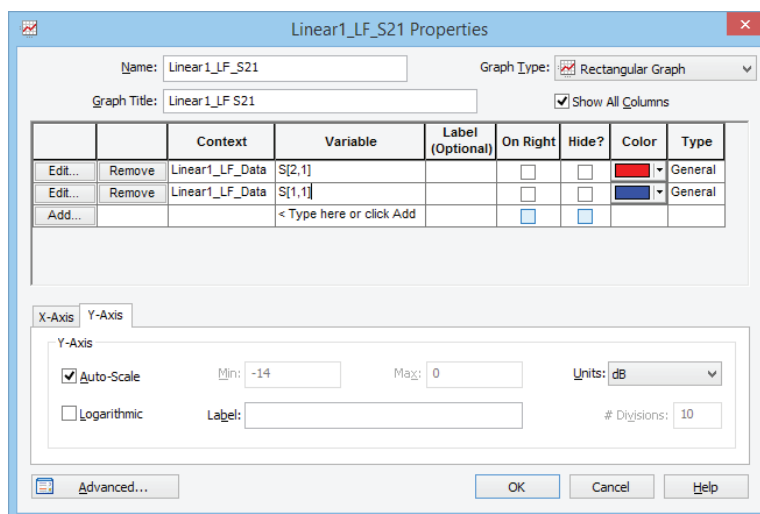


Рис. 1.19. Свойства графика

Наберем в последней строке таблицы в колонке Variable текст « $S_{1,1}$ » (см. рис. 1.19). В таблицу вставится новая строка. Так как мас-

штаб графиков различный, для наглядности поместим ось S_{11} справа, поставив галочку в колонке On Right в добавленной строке. Нажмем кнопку ОК и получим график двух переменных (рис. 1.20).

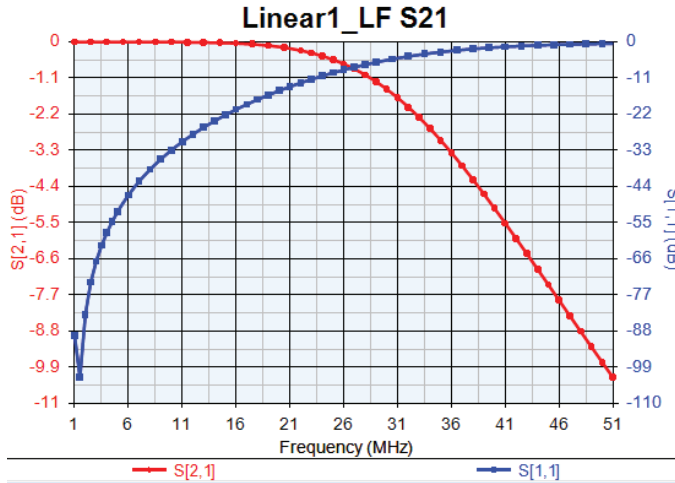


Рис. 1.20. График S_{11} и S_{21}

Если перемещать курсор мыши над линиями графика, программа показывает значения в маленьком всплывающем поле. Для постоянного отображения значения в выбранном положении необходимо щелкнуть на нем, и тогда на графике появится маркер. Поставим маркер на частоте среза фильтра (35 МГц) так, как это показано на рис. 1.21.

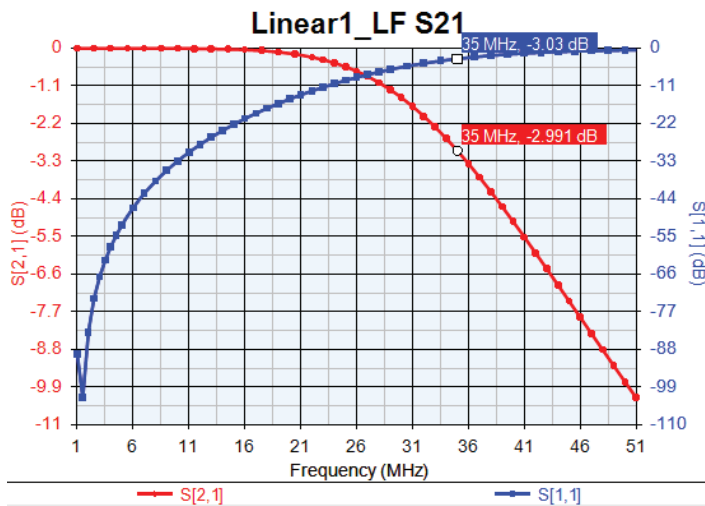


Рис. 1.21. Маркер на графике

По маркеру видно, что значения на частоте среза близки к теоретически ожидаемым (3 дБ), следовательно, фильтр спроектирован правильно.

1.4. Создание и анализ схемы фильтра верхних частот

Добавим схему второго фильтра, вызвав правой клавишей мыши на строке Designs в дереве рабочей области всплывающее меню (рис. 1.22) и выбрав пункт Add — Designs — Schematic.

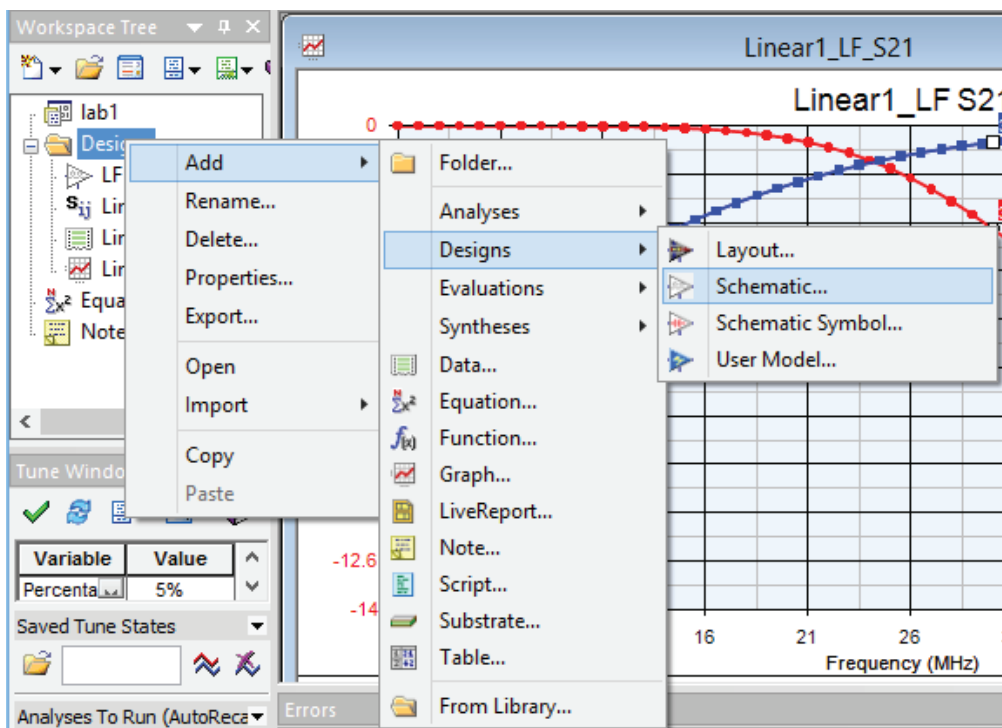


Рис. 1.22. Добавление схемы

Введем название схемы HF как показано на рис. 1.23. Можно добавить краткое описание схемы в нижнее поле.

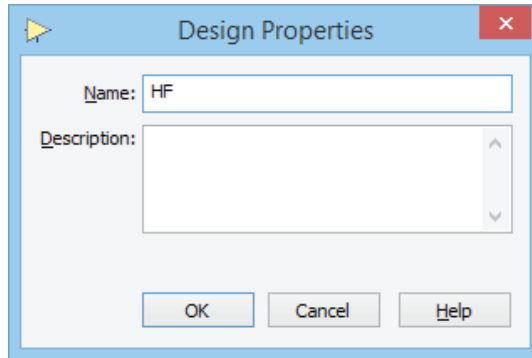


Рис. 1.23. Ввод названия схемы

Изобразим схему фильтра высоких частот и введем значения параметров так, как показано на рис. 1.24.

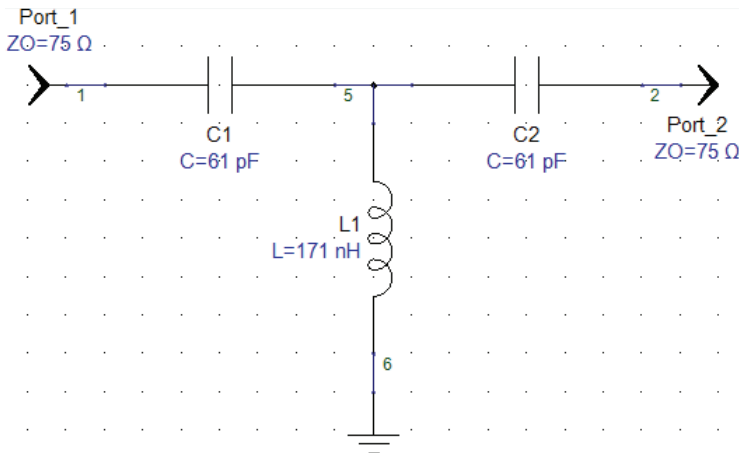


Рис. 1.24. Схема ФВЧ

Хотя ФВЧ в устройстве должен работать в диапазоне от 40 до 1000 МГц наиболее важным является начальный участок характеристик. Поэтому анализировать необходимо именно его. Добавим линейный анализ для диапазона 21...71 МГц и сформируем график входной и передаточной характеристик (рис. 1.25).

Данный фильтр тоже имеет ожидаемые характеристики, а результаты расчета совпадают с результатами моделирования.

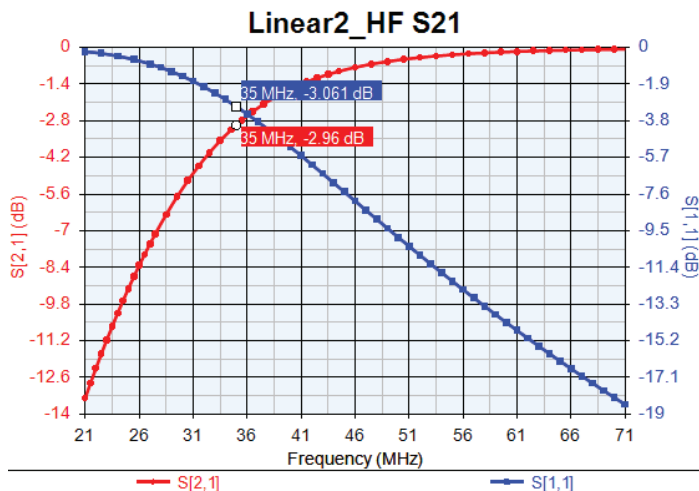


Рис. 1.25. График ФВЧ

1.5. Создание и анализ диплексера

Объединим фильтры как отдельные модели (подсхемы). Для этого выделим все элементы схемы ФНЧ и щелкнем по элементам правой клавишей мыши. Во всплывающем меню (рис. 1.26) выберем пункт Convert to Subcircuit.

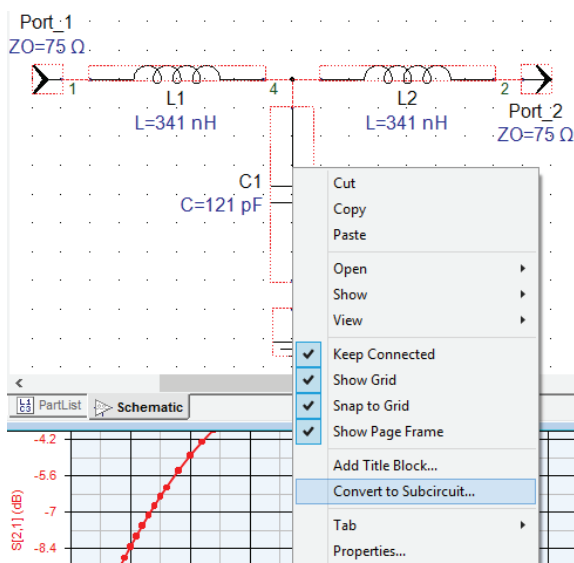


Рис. 1.26. Меню для преобразования в модель

Появится окно для ввода названия модели (рис. 1.27). Оставим его настройки по умолчанию.

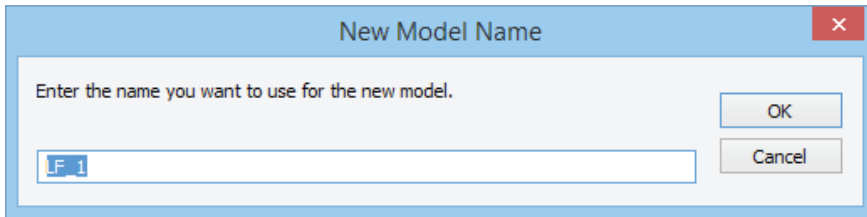


Рис. 1.27. Ввод названия модели

Повторим действия с ФВЧ для создания модели HF_2. Теперь в дереве появились две модели. Добавим схему диплексера и назовем ее LF-HF.

Перетащим из дерева рабочей области на схему модели фильтров, добавим один входной и два выходных порта так, как показано на рис. 1.28. Соединим элементы и отредактируем сопротивления портов.

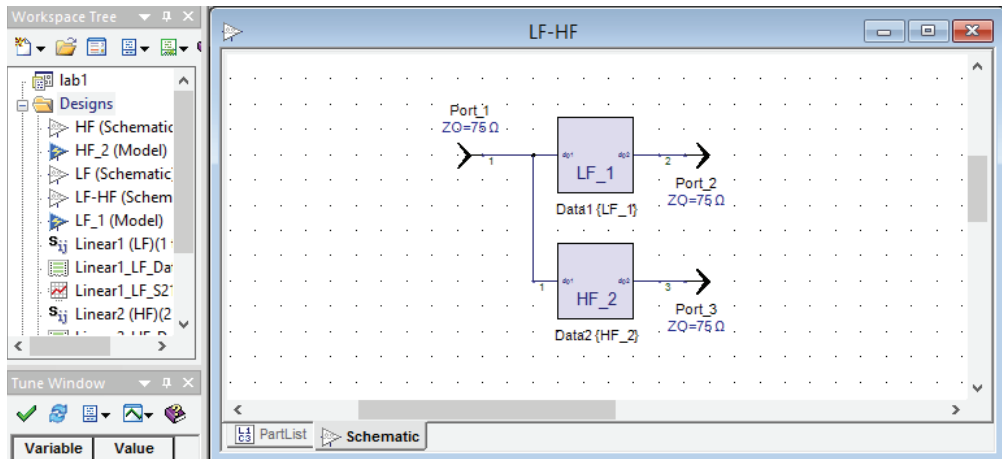


Рис. 1.28. Схема диплексера

Создадим линейный анализ для схемы диплексера, задав диапазон частот от 5 до 65 МГц. Добавим график переменных S_{11} , S_{21} и S_{31} (рис. 1.29).

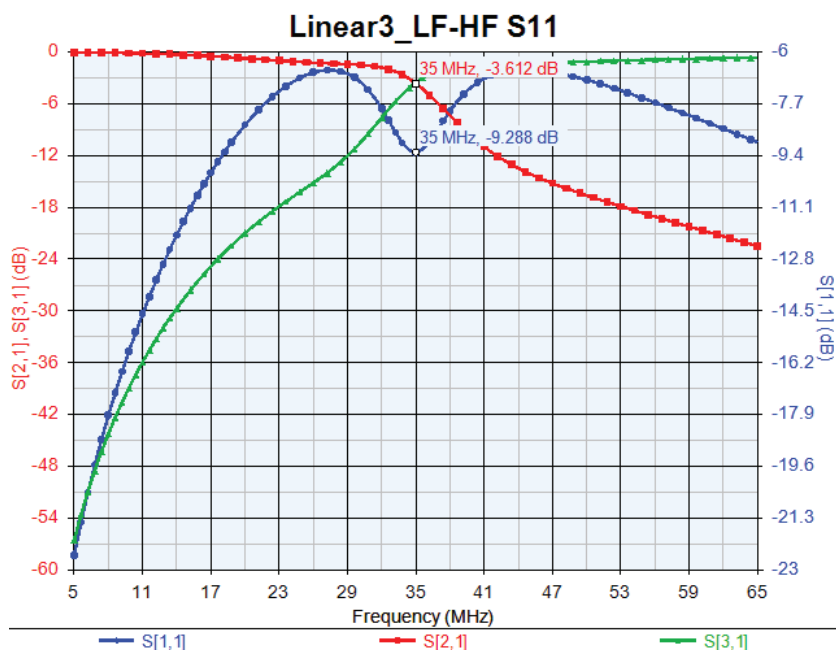



Рис. 1.29. График диплексера

По графику видно, что фильтры оказывают влияние друг на друга: сильно исказились все характеристики (см. рис. 1.29). Например, коэффициент отражения S_{11} вблизи частоты среза резко увеличился, что показывает ухудшение согласования на входе, что приведет к потере значительной части входного сигнала.

Для исправления возникшей ситуации необходима оптимизация схемы диплексера.

1.6. Оптимизация схемы диплексера

Для получения требуемых характеристик необходимо подобрать номиналы элементов схемы. Выберем модель ФВЧ (HF_2). Выделим все элементы и сделаем их настраиваемыми, выбрав значок  на панели инструментов или через пункт меню Schematic — Make Components Tunable (рис. 1.30).

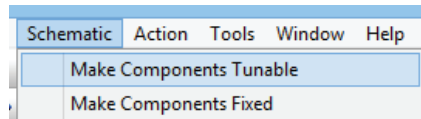


Рис. 1.30. Установка настраиваемых компонентов

Номиналы выделенных компонентов изменят цвет на светло-зеленый и появятся в поле подстройки (рис. 1.31).

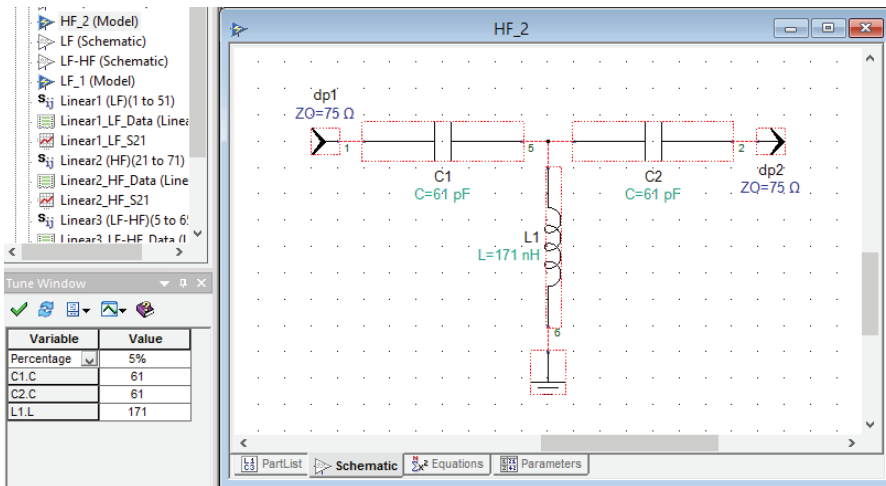



Рис. 1.31. Настраиваемые компоненты

Зафиксируем исходные номиналы элементов, выбрав значок Select a saved Tune State  в нижней части поля подстройки и щелкнув по строке Original (рис. 1.32).

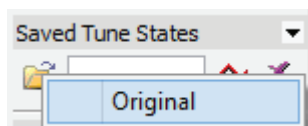



Рис. 1.32. Фиксация исходных номиналов

Включим отображение на графике изменений, выбрав значок Checkpoint graphs and save Tune State  в нижней части поля подстройки. Если изменять номиналы элементов, то на графике (рис. 1.33) можно наблюдать результат изменений.

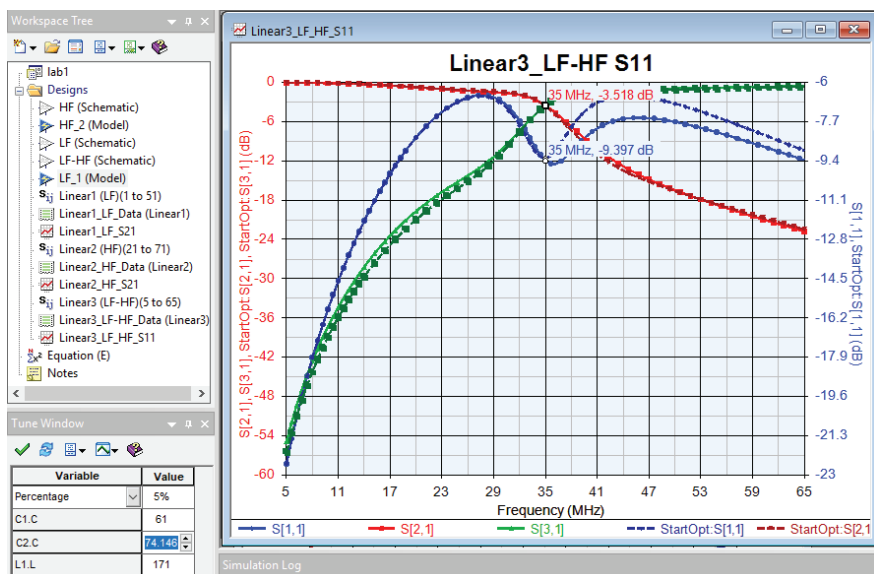


Рис. 1.33. Изменение номинала емкости

Сделаем настраиваемыми элементы модели ФНЧ (LF_1) так, чтобы в поле подстройки было шесть переменных (рис. 1.34).

Tune Window	
Variable	Value
Percentage	5%
C1.C	121
C1.C	61
C2.C	61
L1.L	341
L1.L	171
L2.L	341

Рис. 1.34. Подстройка всех элементов диплексера

Для получения требуемых характеристик необходимо одновременно изменять шесть номиналов, что делать слишком сложно, поэтому используем не ручную, а автоматическую подстройку (оптимизацию). Для этого добавим в дерево рабочей области оптимизацию через всплывающее меню Add — Evaluations — Optimization, как показано на рис. 1.35.

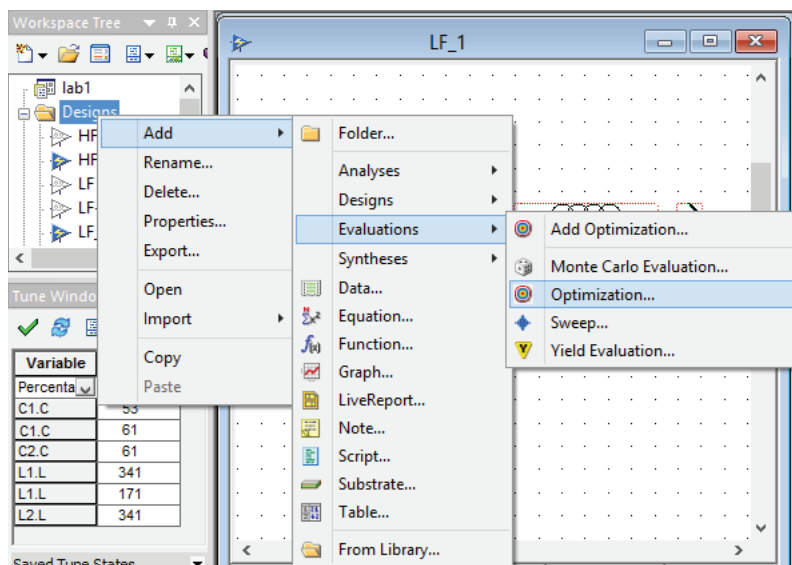


Рис. 1.35. Добавление оптимизации

В открывшемся окне снимем галочки у всех линейных анализов, кроме третьего (рис. 1.36).

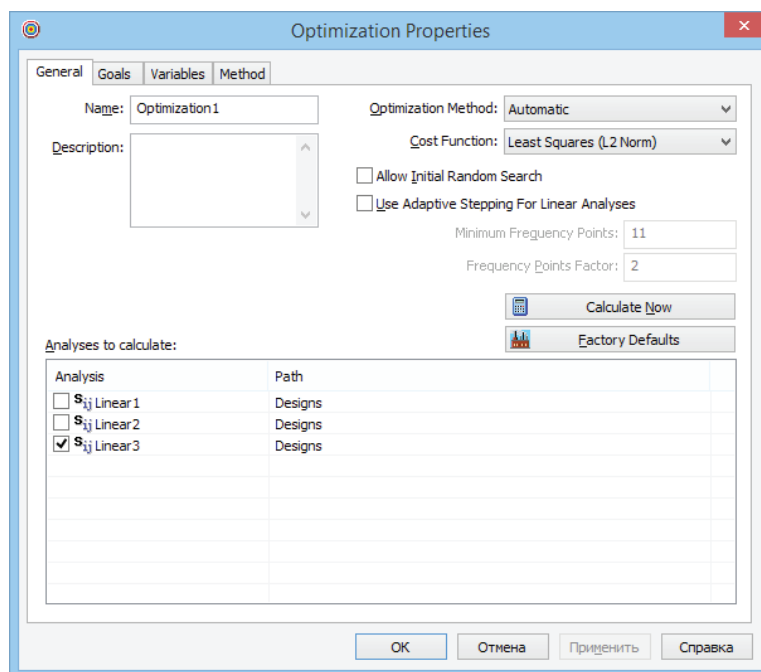


Рис. 1.36. Окно оптимизации

На второй закладке Goal необходимо внести целевые ориентиры для оптимизации. В верхнем переключателе выберем набор данных Linear3_LF-HF_Data, как показано на рис. 1.37.

Первый целевой параметр — полоса пропускания. В полосе пропускания затухание должно быть больше -3 дБ. В двух первых строках задаем это значение для S_{21} в диапазоне $5...30$ МГц и для S_{31} в диапазоне $40...65$ МГц.

Вторая цель — полоса задержания. В полосе задержания переходные характеристики должны быть меньше -3 дБ. В следующих двух строках зададим это значение для S_{21} в диапазоне $35...65$ МГц и для S_{31} в диапазоне $5...35$ МГц.

Последний целевой параметр — отражение на входе. Во всем диапазоне S_{11} должно быть меньше -50 дБ. Зададим это значение в последней строке. Установим для него весовой коэффициент 10 (он определяет важность оптимизации именно этого параметра).

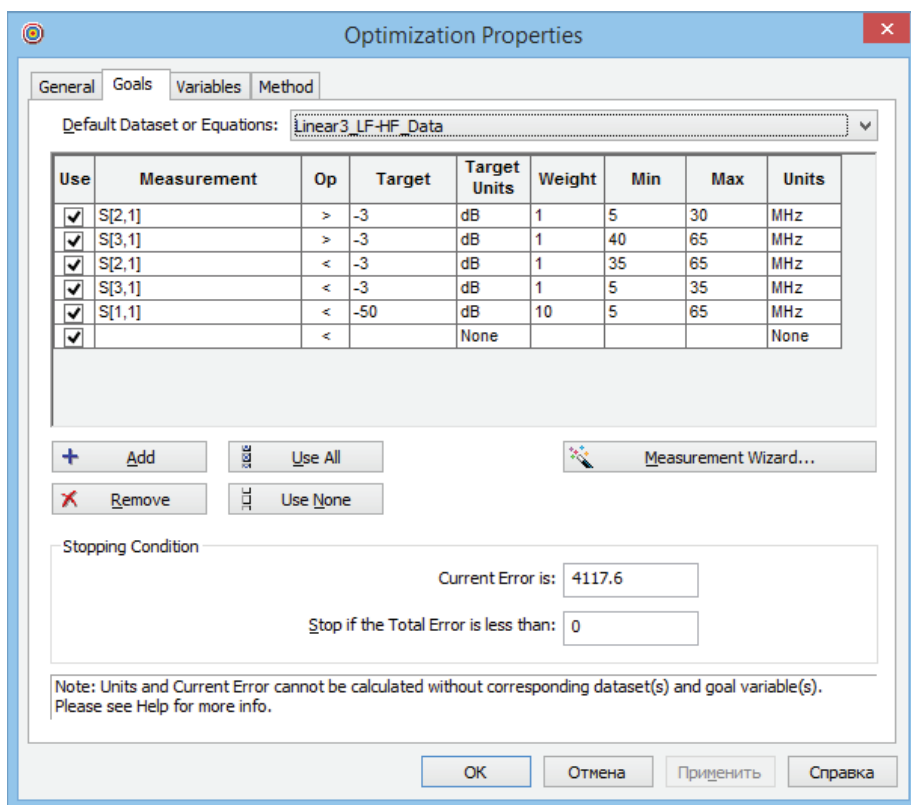


Рис. 1.37. Задание целевых параметров

В нижней части окна отображается текущая разница (ошибка) от требуемых значений. Задача оптимизации свести эту ошибку к 0.

На следующей закладке Variables необходимо определить элементы, номиналы которых будут оптимизироваться. Нажмем кнопку Get Tuned Variables для установки настраиваемых номиналов (рис. 1.38). На следующей закладке Method определяются методы оптимизации. Оставим их значения по умолчанию.

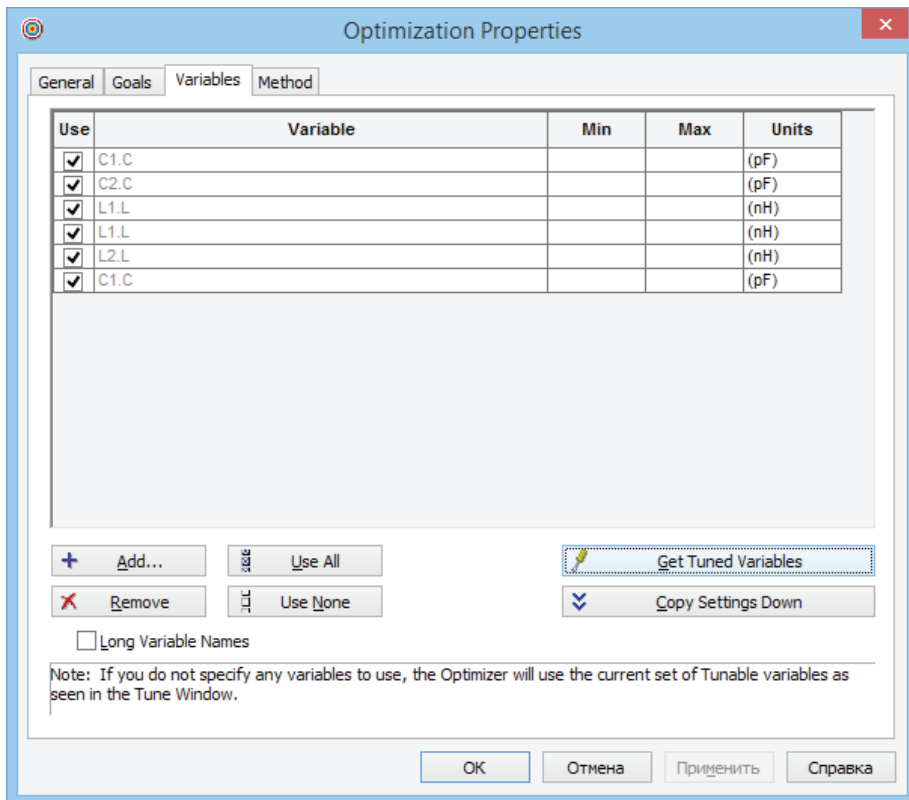



Рис. 1.38. Выбор оптимизируемых переменных

Введенные целевые параметры должны отобразиться на графике в виде областей отличающегося цвета с пунктирными границами так, как показано на рис. 1.39.

Запустим оптимизацию. Для этого щелкнем на черной стрелочке значка Run Analyses  и в выпавшем меню выберем строку Designs\Optimization1 (рис. 1.40).

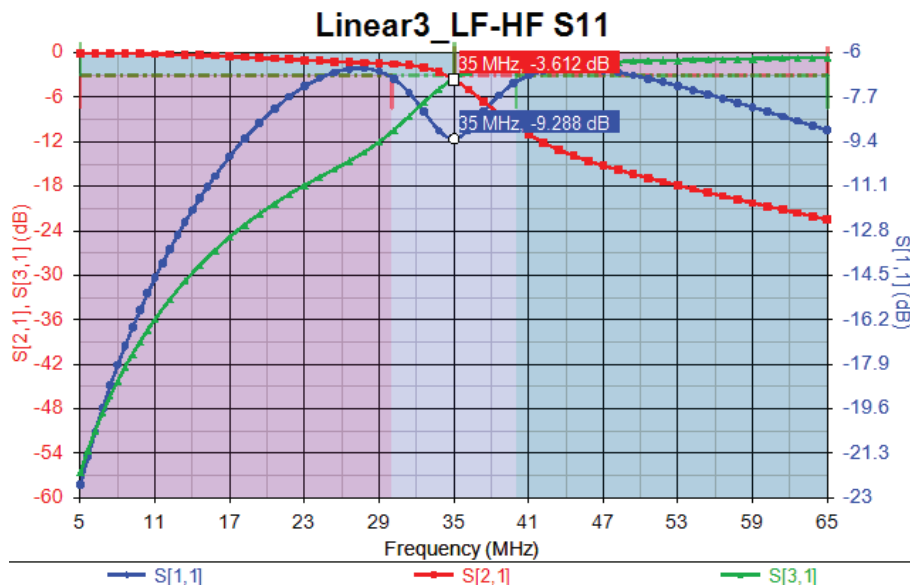


Рис. 1.39. График с целевыми параметрами

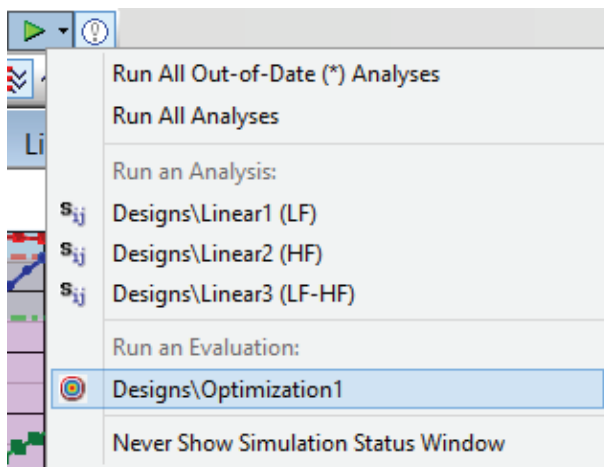


Рис. 1.40. Запуск оптимизации

На экране отобразится окно процесса оптимизации (рис. 1.41). В процессе оптимизации ошибка уменьшается, график периодически обновляется и можно оценить его изменение. Через некоторое время оптимизация закончится и окно закроется.

На графике отобразится результат оптимизации (рис. 1.42). По нему видно, что цели оптимизации выполнены.

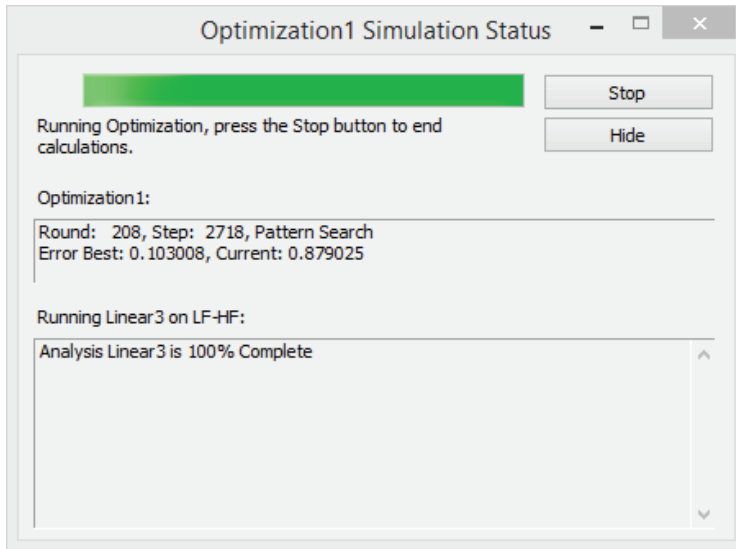


Рис. 1.41. Окно процесса оптимизации

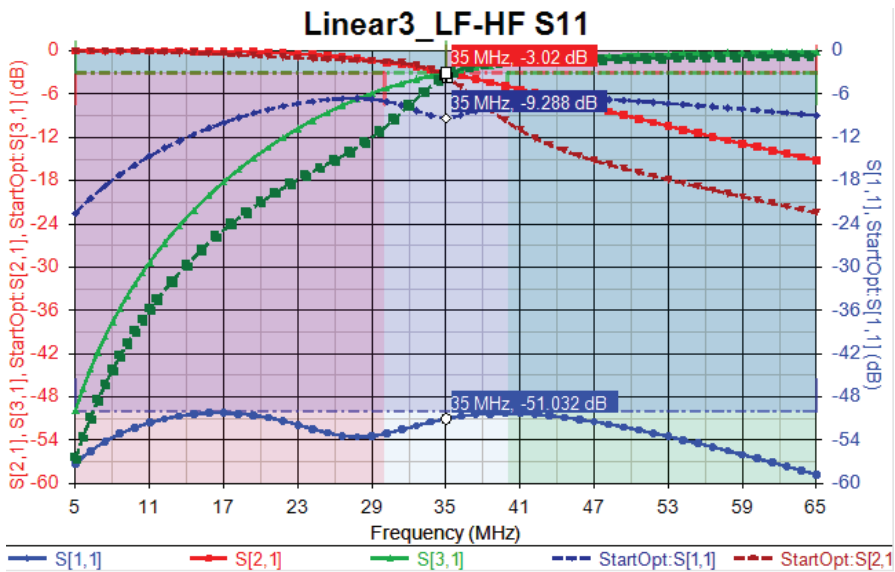




Рис. 1.42. График после оптимизации

Значения элементов диплексера, полученные в результате оптимизации (рис. 1.43), значительно отличаются от исходных значений фильтров Баттерворта, с которых началась оптимизация, так как компенсируют объединение фильтров.

Полученные величины могут отличаться от изображенных на рисунке, так как при оптимизации используется случайный поиск.

Tune Window	
Variable	Value
Percentage	5%
C1.C	78.015
C1.C	40.454
C2.C	126.92
L1.L	507.254
L1.L	261.333
L2.L	153.527

Рис. 1.43. Значения после оптимизации

Оставим на графике только результаты оптимизации, выбрав значок Select a saved Tune State  в нижней части поля подстройки и последнюю строку EndOpt. Нажмем кнопку Remove all graph checkpoints  и поставим маркер на 35 МГц. Получим график, приведенный на рис. 1.44.

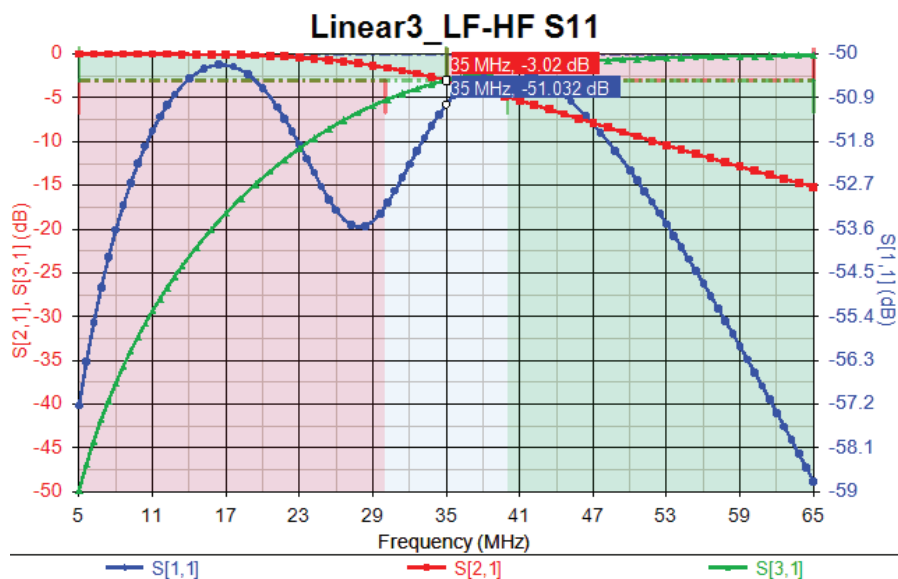


Рис. 1.44. График с результатами оптимизации

Значения S_{11} во всем диапазоне не превышают -50 дБ, отражение входного сигнала минимальное. На верхней границе диапазоне ФНЧ величина S_{21} падает не более чем на 3 дБ: на 2 порт нижние частоты проходят практически без потерь. На нижней границе диапазоне ФВЧ величина S_{31} падает не более чем на 3 дБ: на 3 порт верхние частоты передаются почти полностью.

1.6. Контрольные вопросы

1. Для чего предназначен диплексер?
2. Что означает нормирование значений элементов фильтров?
3. Почему для выбора элементов наиболее часто используются клавиши клавиатуры?
4. Почему для фильтров используется линейный анализ?
5. Как обозначается в программе проходная характеристика?

2. Разработка автогенератора

Важным устройством, входящим в состав радиотехнических систем, является автогенератор, способный вырабатывать стабильную частоту для последующего использования в работе радиочастотного тракта. В качестве примера проектирования в программе Genesys нелинейных схем, исследуем автогенератор на частоте f с кварцевым резонатором [5, с. 221], с относительной нестабильностью частоты порядка $10^{-5} \dots 10^{-7}$ (рис. 2.1).

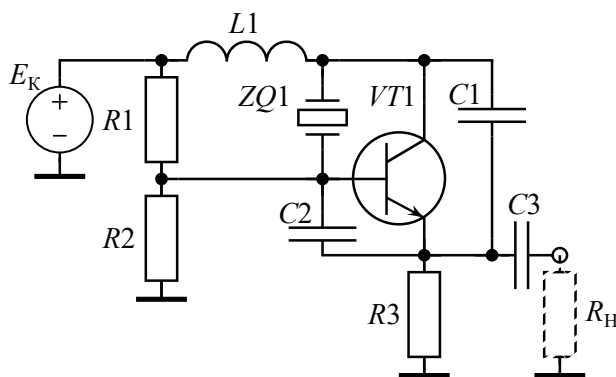


Рис. 2.1. Схема автогенератора

Схема представляет собой емкостную трехточку на биполярном транзисторе $VT1$ с конденсаторами $C1$, $C2$ и кварцевым резонатором $ZQ1$, исполняющим роль индуктивности. Питание на коллектор подается через блокировочную индуктивность $L1$, а на базу — через делитель $R1$, $R2$. В эмиттерную цепь включен резистор автосмещения $R3$, к которому подключена нагрузка через емкость $C3$.

Для расчета элементов используем методику, основанную на расчетах В. А. Вороны [6, с. 302–306], которая состоит из трех этапов:

- расчет по постоянному току,
- расчет по переменному току,
- энергетический расчет генератора.

Расчеты автоматизируем, так как программа позволяет рассчитывать значения элементов по заданным формулам и подставлять рассчитанные значения на схему. Это значительно ускоряет процесс настройки и оптимизации разрабатываемого узла. Достаточно изменить исходные данные, и программа пересчитает значения элементов, занесет их на схему и перестроит графики результатов анализа. Поэтому все расчеты будем производить средствами программной среды Genesys.

После расчетов проведем анализ полученной схемы.

2.1. Определение параметров транзистора

Создадим новый проект. Переименуем автоматически созданную схему Sch1 в TTest. Сохраним проект, выбрав каталог и название, например, тип транзистора.

Будем использовать модель транзистора из внешнего файла, так как встроенные модели содержат ошибки. Вызовем правой клавишей мыши на названии проекта в дереве рабочей области всплывающее меню и выберем Import — Circuit Files — SPICE File (рис. 2.2).

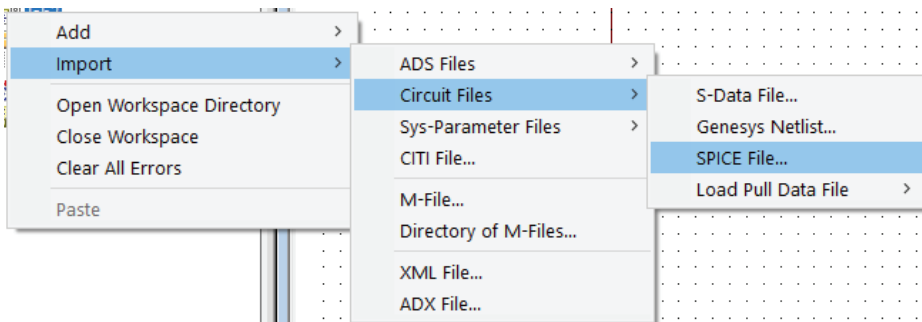


Рис. 2.2. Импорт модели транзистора

Откроем каталог, в который были сохранены модели транзисторов, полученные от производителя компонентов, и выберем модель тран-

зистора BFG10. В окне параметров импорта отметим сохранение исходного файла в секцию заметок, чтобы можно было проверить модель, и нажмем кнопку ОК (рис. 2.3).

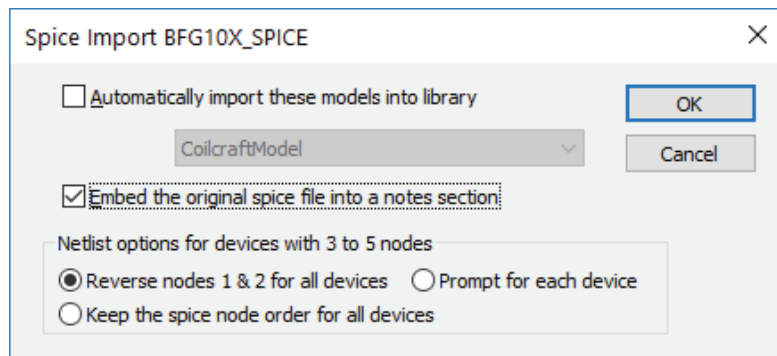


Рис. 2.3. Параметры импорта модели транзистора

В дереве рабочей области появится модель. Выберем ее свойства и изменим символ (кнопка Change Symbol) на изображение биполярного NPN транзистора BIP_NPN так, как показано на рис. 2.4.

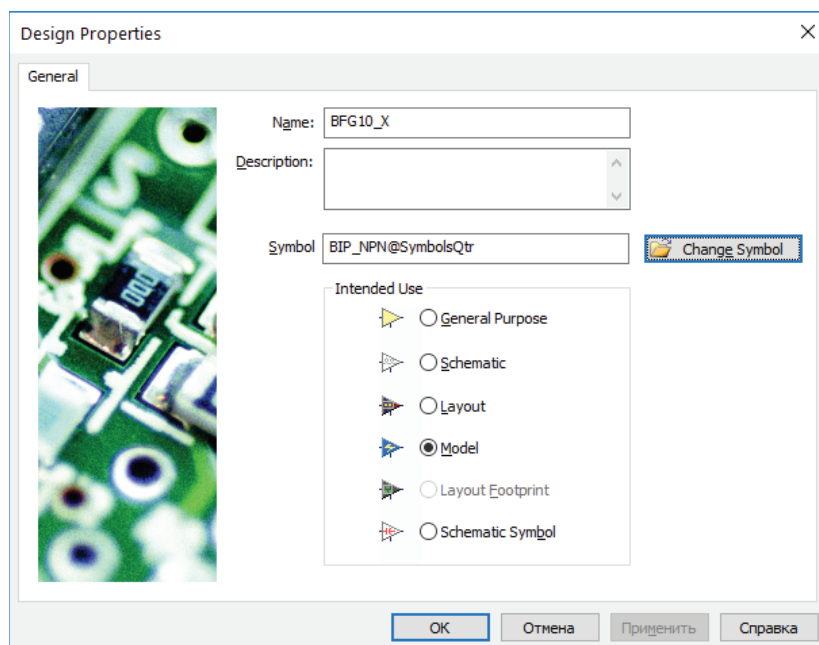


Рис. 2.4. Параметры модели транзистора

Перетащим модель на поле схемы.

Для определения параметров транзистора необходима выходная статическая характеристика $i_k(e_k)$. Ее получим, изменяя напряжение коллектора при различных токах базы, и измеряя ток коллектора. Подключим к базе транзистора источник постоянного тока, а к коллектору источник постоянного напряжения через датчик тока. Элементы возьмем с базовой панели, открывающейся из главной (рис. 2.5, 1), а затем из панели групп элементов (2). Щелкнем на значке группы источников и датчиков (3) и выберем нужные элементы.

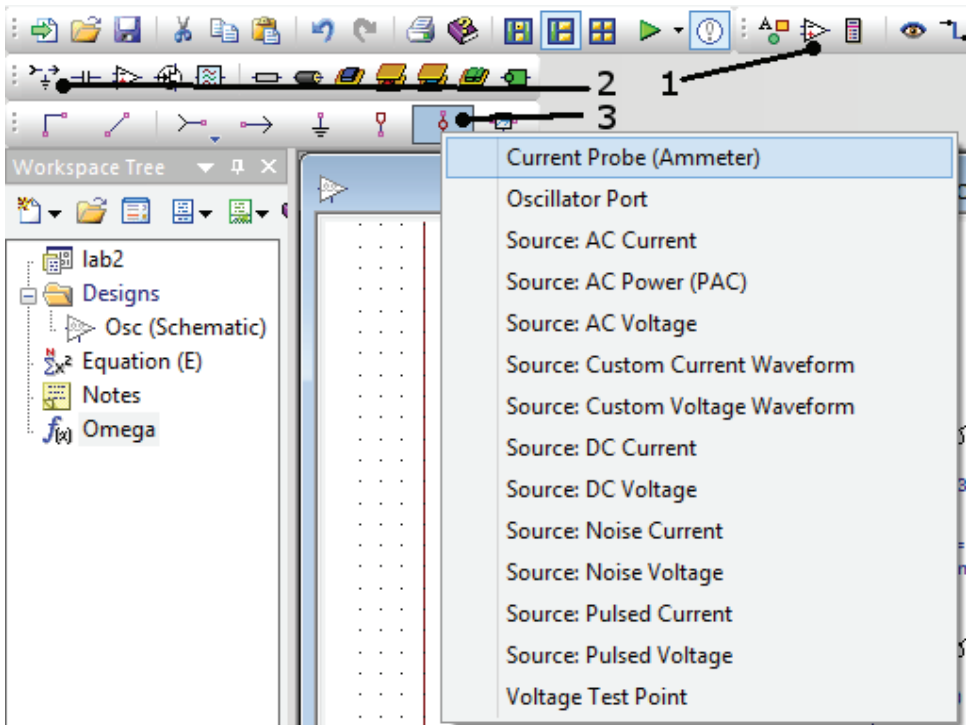


Рис. 2.5. Добавление источников и датчика тока

Должна получиться схема, близкая к изображенной на рис. 2.6. Проверим, что направление тока в измерителе совпадает с показанным на рисунке.

Если необходимо отобразить элемент зеркально — используйте клавишу **F6**.

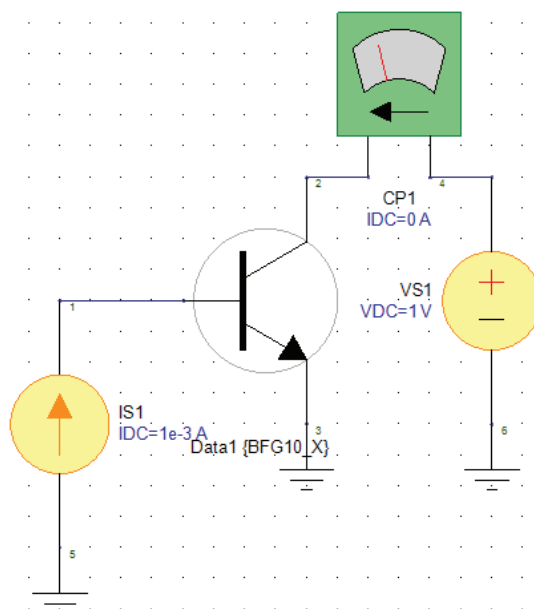



Рис. 2.6. Схема определения параметров транзистора

Для расчетов используем возможности среды для решения уравнений. Откроем пункт Equation в дереве слева. В рабочей области появится поле для ввода расчетных уравнений.

Genesys позволяет вводить уравнения или на встроенном инженерном языке или на MATLAB Script. Второй вариант более распространен, поэтому будем использовать его. Тип отображается на панели в верхней части окна (кнопка E), по умолчанию используется инженерный язык. Нажмем кнопку и выберем MATLAB Script так, как показано на рис. 2.7. Значок изменится на .

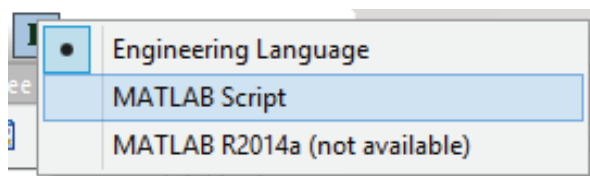


Рис. 2.7. Смена типа языка уравнений

Настоятельно рекомендуем ознакомиться с синтаксисом выражений MATLAB в справке программы. Для этого можно открыть

справку Help-Topics and Index и выбрать раздел Users guide-Using Genesys-Equation and Functions-MATLAB Script-MATLAB Script Syntax.

Зададим переменные для тока базы и напряжения коллектора в соответствии с требованиями MATLAB. Слева пишется название переменной, начинающееся с латинской буквы (строчные и прописные буквы различаются), затем знак равенства и значение переменной. Переменные сделаем настраиваемыми, используя функцию tune () со значениями 0,0005 А для тока базы и 1 В для напряжения коллектора как показано на рис. 2.8.

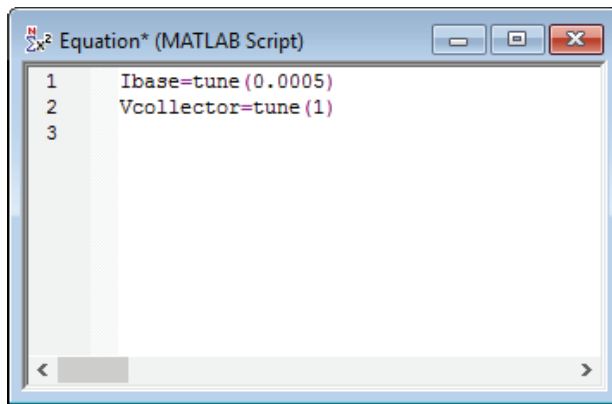


Рис. 2.8. Переменные тока базы и напряжения коллектора

По умолчанию расчет уравнений производится автоматически. Но для проверки произведем перерасчет из контекстного меню — пункт Run Equation. Если имеются ошибки, они отобразятся в поле ошибок, и появится соответствующий значок на панели.

Зададим в качестве значений источников тока базы и напряжения коллектора на схеме переменные из Equation. Для этого введем в качестве значения параметра элемента название переменной. Программа выведет значение переменной слева, а название в квадратных скобках — справа (рис. 2.9).

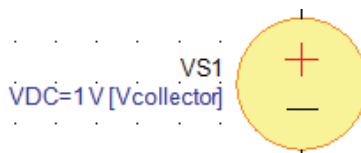


Рис. 2.9. Переменная в качестве значения параметра элемента

Добавим анализ по постоянному току (DC) и зададим название схемы в окне диалога (рис. 2.10).

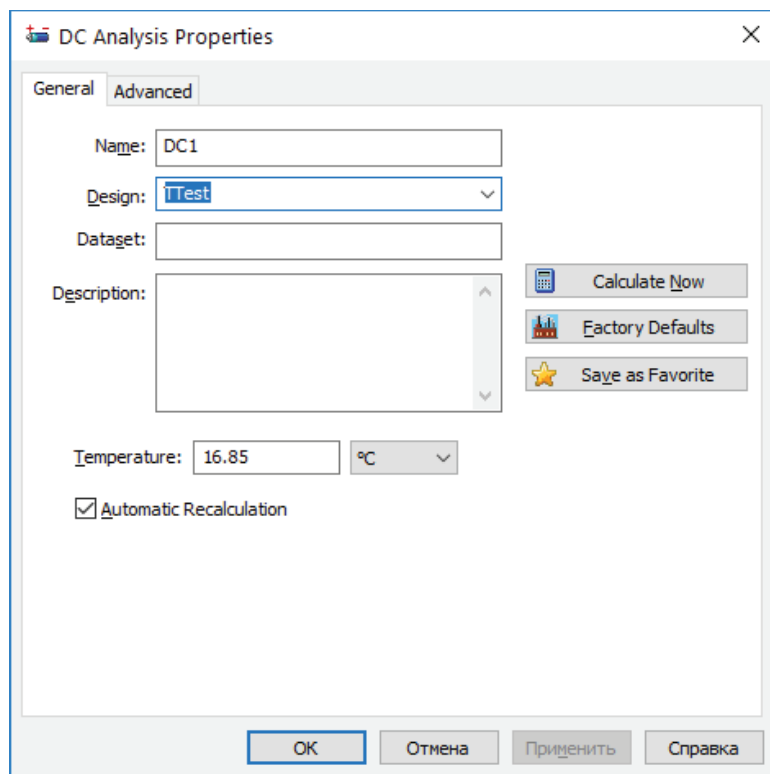


Рис. 2.10. Создание анализа по постоянному току

Добавим развертку напряжения коллектора. Вызовем правой клавишей мыши на названии проекта в дереве рабочей области всплывающее меню и выберем Add — Evaluations — Sweep (рис. 2.11).

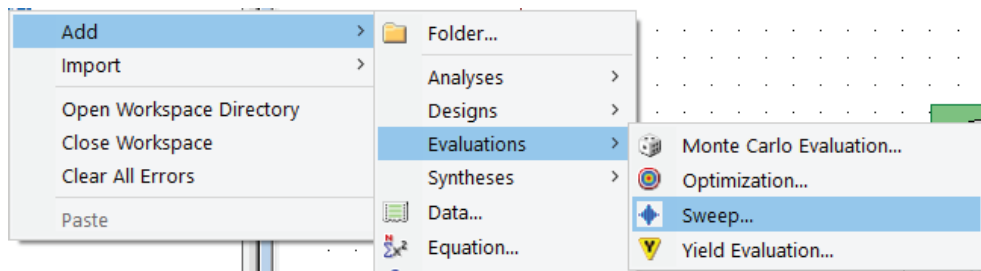


Рис. 2.11. Создание развертки

Изменим название развертки на VcSweep, а в качестве параметра для изменения выберем Equation\Vcollector (рис. 2.12).

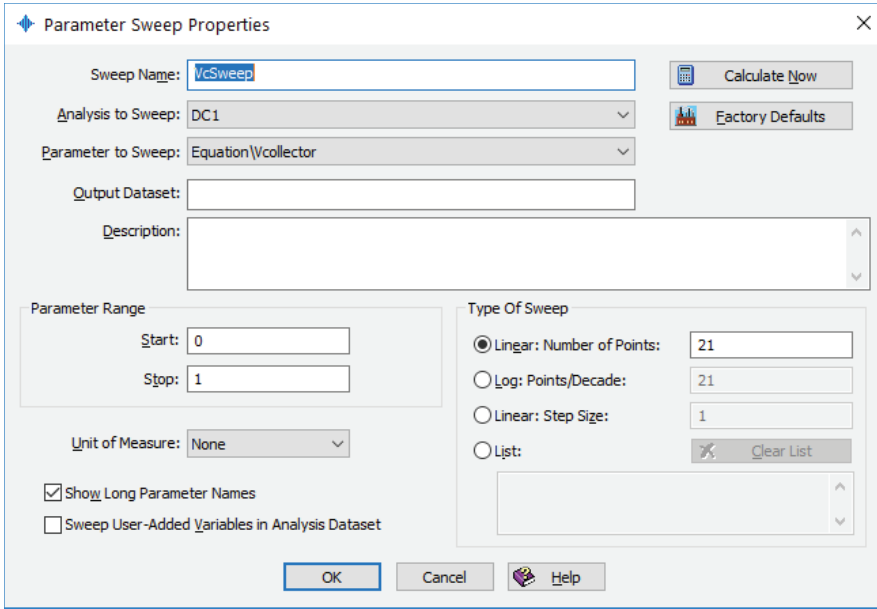


Рис. 2.12. Параметры развертки напряжения коллектора

Диапазон изменения зададим от 0 до 1 В, а число точек увеличим до 21.

Аналогично добавим развертку для тока базы (IbSweep), но в качестве анализа для развертки выберем VcSweep, а параметр для изменения зададим Equation\Ibase. Диапазон изменения задаем от 0 до 0,0005 А, а число точек изменим на 6.

Проведем расчеты разверток. Добавим график выходной характеристики. В качестве содержимого задаем IbSweepData, а переменной — ток датчика тока IC1 (рис. 2.13).

Так как режим работы транзистора близок к граничному, необходимо определить значения вблизи изгиба характеристики. Добавим маркер на точку изгиба характеристики.

Выберем линию в верхней части. Определим сопротивление насыщения для выбранной линии, для примера выберем на рис. 2.13 линию 0,02 А и получим:

$$r_{\text{НАС}} = e_K / i_K = 0,15 / 0,02 = 7,5.$$

Для этой же точки оценим коэффициент усиления по току транзистора:

$$h_{219} = i_K / i_B = 0,02 / 0,0003 = 66.$$

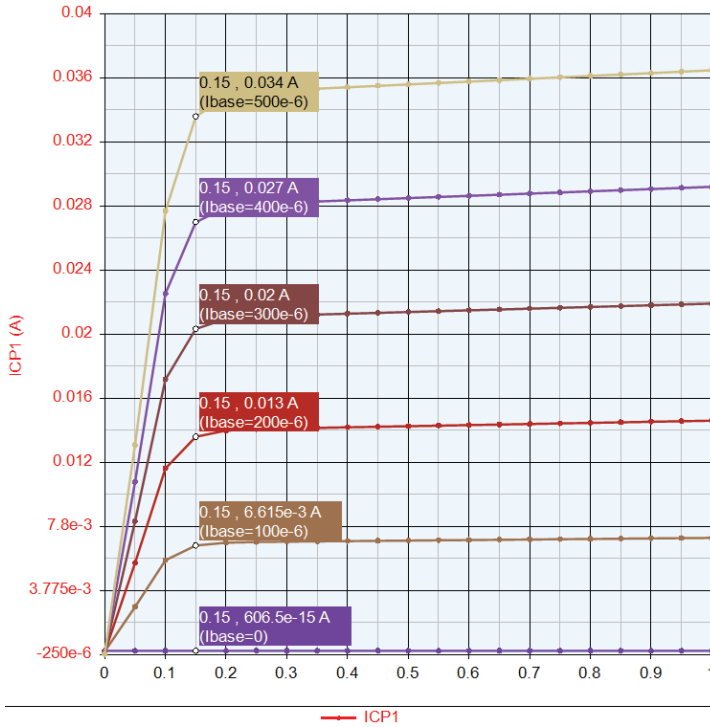


Рис. 2.13. График выходной характеристики

При расчетах используем окно Equation. Результаты заносятся в Workspace Variables. Для их просмотра выберем пункт меню View — Workspace Variables. В правой части окна появится поле, где отображаются переменные и их значения. Сохраним в проекте выбранные значения тока коллектора, полученные значения сопротивления насыщения и коэффициент усиления транзистора: 20 мА, 7,5 Ом и 66.

2.2. Расчет автогенератора по постоянному току

Создадим новый проект. Переименуем автоматически созданную схему Sch1 в Osc. Сохраним проект, выбрав каталог и название, например, lab2.

Аналогично предыдущей схеме добавим в проект модель того же транзистора, как в предыдущем пункте. Установим, согласно рисунку 2.1, элементы на поле схемы. В библиотеке Eagleware находится кварцевый резонатор — Crystal. Чтобы переключить библиотеку, необходимо в селекторе компонентов нажать на выпадающий список Current Library.

Поправим символы резисторов на символы, соответствующие отечественным стандартам. Для этого в свойствах резистора (Properties) необходимо выбрать Advanced Options и в открывшемся окне закладки Symbol. Нажмем Change Symbol и в появившемся меню выберем пункт ISO_Resistor (рис. 2.14).

Можно создать изображения для элементов из библиотеки, не соответствующих отечественным стандартам, если выбрать Create Custom Symbol. Можно установить символы ISO по умолчанию в настройках программы.

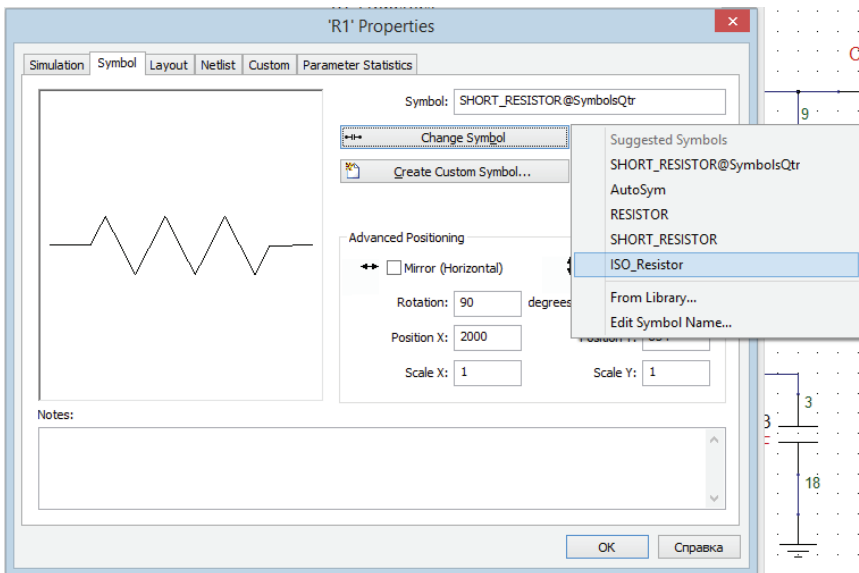


Рис. 2.14. Изменение символа резистора

Для измерения потребляемого автогенератором тока включим датчик тока последовательно с источником питания VS1. Датчик тока позволит при подборе величин элементов контролировать потребляемый автогенератором ток.

Изменим в свойствах кварцевого резонатора обозначение Designator на ZQ1, а транзистора — на VT1. Соединим элементы. Должна получиться схема, подобная изображенной на рис. 2.15.

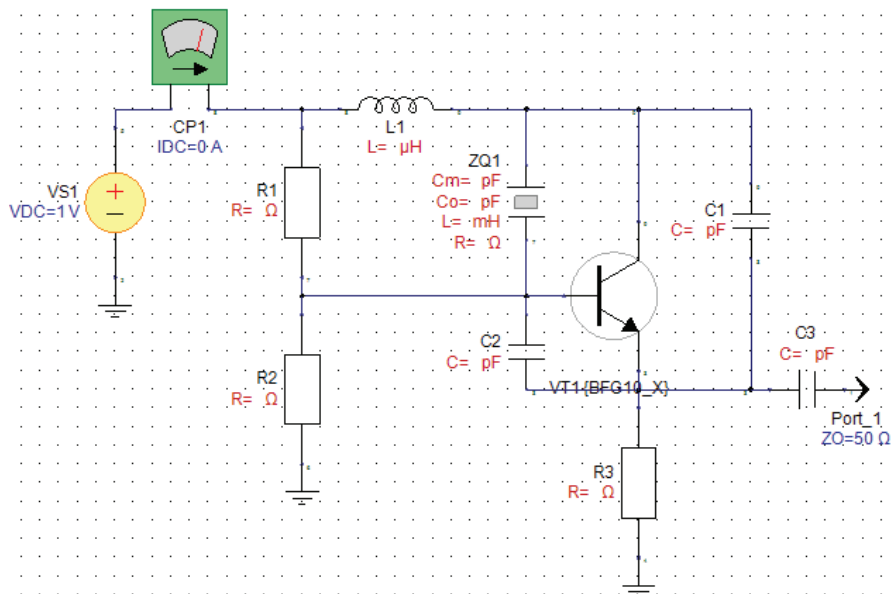


Рис. 2.15. Схема автогенератора после соединения элементов

Для расчетов элементов используем уравнения, связанные с этой схемой (пример выражений приведен в Приложении 2). Щелкнем правой клавишей мыши на закладке под схемой и выберем пункт Add Equation (рис. 2.16).

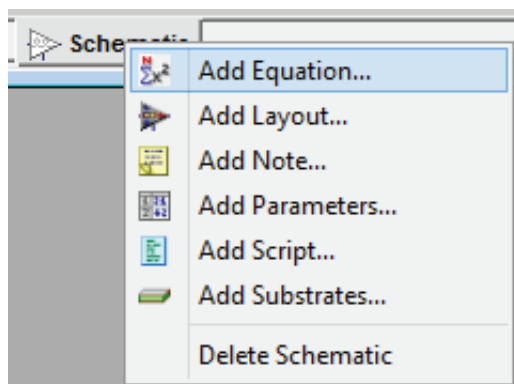


Рис. 2.16. Добавление закладки уравнений

Появится новая закладка, на которой вводятся требуемые уравнения. Желательно использовать комментарии, которые позволят быстро найти нужное место в процессе работы. Они начинаются с процента и продолжаются до конца строки (рис. 2.17).

```
% Исходные данные
% Вариант № 0
Fr=10 % Частота в МГц
Eke=4
% транзистор BFG10
h21e=66
rb=3.5
re=0.22
Ikdop=0.25
Ukdop=20
Pkdop=0.4
```

Рис. 2.17. Исходные данные

В автогенераторах используются маломощные высокочастотные транзисторы с выходной мощностью сотни милливатт [6, с. 286; 7, с. 159]. Если мощность слишком мала, увеличивается нестабильность параметров и начинает сказываться дробовый шум, если велика — значительно увеличивается тепловой нагрев, приводящий к частотной нестабильности. Существует рекомендуемый диапазон, в котором современные транзисторы обеспечивают минимальные значения шума и нестабильности. Для типовой мощности кварцевого автогенератора необходим постоянный ток коллектора $I_{K0} = 2 \dots 5$ мА.

При расчете по постоянному току используем схему, приведенную на рис. 2.18.

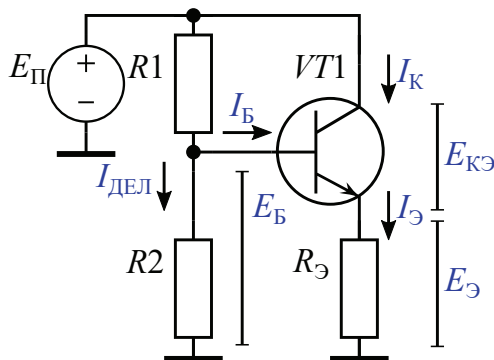


Рис. 2.18. Схема автогенератора по постоянному току

Напряжение на сопротивлении автосмещения $E_{\text{э}}$ выбирают на основе компромисса между температурной стабилизацией и напряжением питания. При увеличении напряжения автосмещения растет температурная стабильность, однако, постепенно рост замедляется, и излишек напряжения питания используется неэффективно. Рекомендуемое значение $E_{\text{э}} = 1 \dots 3 \text{ В}$, но не более $1/3$ от напряжения источника питания.

Заданное $E_{\text{кэ}}$ и выбранное $E_{\text{э}}$ напряжения определяют напряжение источника питания по формуле:

$$E_{\text{п}} = E_{\text{кэ}} + E_{\text{э}}. \quad (2.1)$$

Полученное значение нужно привести к ближайшему стандартному значению для использования унифицированных источников питания. Для транзисторных каскадов могут быть использованы следующие постоянные напряжения питания: 3, 4, 5, 6, 9, 12, 15, 20, 24, 27, 30, 48, 60, 80 В [8, с. 21].

Для примера выберем напряжение на сопротивлении автосмещения 1 В и получим стандартное напряжение питания 5 В.

Добавим значения тока коллектора и напряжения на эмиттере, выбрав их из рекомендуемого диапазона значений (рис. 2.19). Посчитаем напряжение источника питания по формуле (2.1).

```
% Расчет
% по постоянному току
% выбор значений
Ik0=3e-3 % ток коллектора (2...5)mA
Ee=1 % напряжение эмиттера (1...3)V
Ep=Eke+Ee
Ib0=Ik0/h21e
Ie0=Ib0+Ik0
Re=round(Ee/Ie0)
Idl=10*Ib0
R1=round((Ep-Ee-0.7)/(Idl+Ib0))
R2=round((Ee+0.7)/Idl)
```

Рис. 2.19. Расчет по постоянному току

Ток базы вычисляется из коллекторного по коэффициенту усиления транзистора $h_{21\text{э}}$, а ток эмиттера является суммой базового и коллекторного:

$$I_{B0} = \frac{I_{K0}}{h_{21Э}}, \quad I_{Э0} = I_{B0} + I_{K0}. \quad (2.2)$$

Сопротивление автосмещения определяется на основе выбранных значений:

$$R_Э = \frac{E_Э}{I_{Э0}}. \quad (2.3)$$

Проведем расчет токов и сопротивлений в эмиттерной цепи по формулам (2.2) и (2.3). Значение сопротивления округлим до целого. Используем для этого встроенную функцию «round ()» так, как показано на рис. 2.19.

Описание встроенных функций MATLAB можно найти в справке программы.

Расчет уравнений схемы производится автоматически при переходе на вкладку схемы. Проверим результаты расчета. Для этого выберем пункт меню View — Design Variables. В правой части окна появится поле, где отображаются переменные и их значения.

Как видно на рис. 2.20 сопротивление в эмиттерной цепи получилось равным 328 Ом.

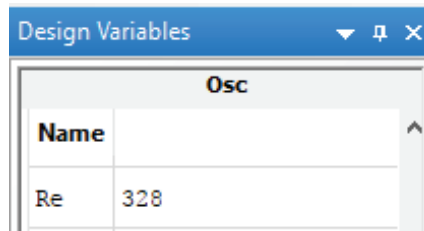


Рис. 2.20. Переменные и их значения

Можно просто записать 328 как значение резистора в эмиттерной цепи (R3), но удобнее использовать название переменной. В этом случае при пересчете уравнений значение резистора будет автоматически изменяться. Для этого откроем свойства резистора и введем в строке номинала название переменной (в нашем случае это Re). После закрытия окна свойств номинал резистора станет равным рассчитанному значению (рис. 2.21).

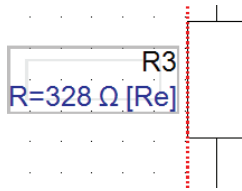


Рис. 2.21. Номинал резистора

Ток делителя цепи фиксированного смещения должен превышать ток базы, однако слишком большой ток потребует малых значений сопротивлений, которые уменьшают добротность и ухудшают стабильность частоты. Поэтому ток делителя выбирают по следующему соотношению:

$$I_{\text{ДЕЛ}} = 10 I_{\text{Б0}}. \quad (2.4)$$

Напряжение на базе кремневого транзистора превышает напряжение эмиттера приблизительно на 0,7 В. Сопротивления делителя определяются по следующим формулам:

$$R1 = \frac{E_{\text{П}} - E_{\text{Э}} - 0,7}{I_{\text{ДЕЛ}} + I_{\text{Б0}}}, \quad R2 = \frac{E_{\text{Э}} + 0,7}{I_{\text{ДЕЛ}}}. \quad (2.5)$$

Добавим расчет цепи смещения по формулам (2.4) и (2.5). Значения сопротивлений округлим до целого.

2.3. Расчет автогенератора по переменному току

Для расчета повторяющихся действий, например, угловой частоты, используем функции. Для этого выберем в дереве проекта его название и вызовем всплывающее меню. В нем выберем пункт Add — Function (рис. 2.22).

Введем название функции, например, Omega, и программа создаст шаблон функции. Изменим его в соответствии с рисунком 2.23, чтобы получилась функция, пересчитывающая частоту МГц в Гц и умножающая на 2π (угловая частота). После этого функцию можно будет использовать в уравнениях.

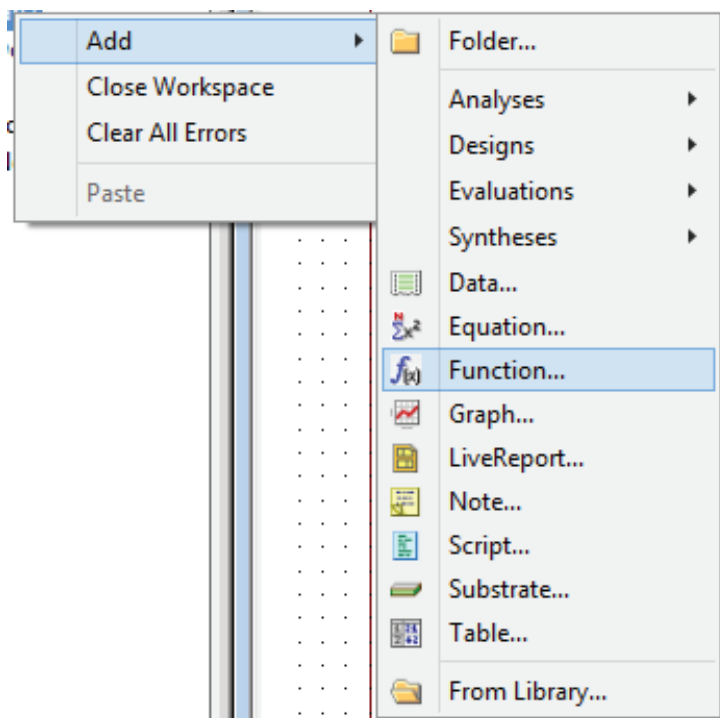


Рис. 2.22. Добавление функции

```
function retOmega = Omega(FrMHz)
% входная частота в МГц
FrHz=FrMHz*1e6
retOmega=2*pi*FrHz % возвращаемое значение
end
```

Рис. 2.23. Текст функции

Рабочую частоту автогенератора определяет кварцевый резонатор, поэтому определим его параметры в соответствии со схемой замещения (рис. 2.24). Емкости типовых резонаторов для диапазона частот 1...20 МГц следующие: статическая — $C_0 = 4$ пФ, динамическая — $C_m = 0,0127$ пФ. Динамическая индуктивность L_m определяется из формулы Томсона:

$$L_m = \frac{1}{\omega^2 C_m}, \quad (2.6)$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, которую определим с помощью введенной ранее функции.

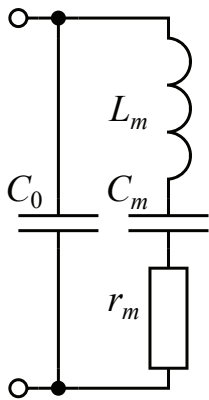


Рис. 2.24. Схема замещения кварцевого резонатора

Сопротивления типовых кварцевых резонаторов в среде Genesys для различных частот приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Сопротивления кварцевых резонаторов										
Показатели	Значения									
f_{KB} , МГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r_m , Ом	537	153	82	57	45	39	35	33	31	30
f_{KB} , МГц	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
r_m , Ом	29	29	28	28	27	27	27	27	26	26

Добавим параметры кварцевого резонатора, выбрав сопротивление для нашего случая (рис. 2.25).

```
% Расчет
% по переменному току
% параметры КР
C0=4 % pF
Cm=0.0127 % pF
Lm=1/(Omega (Fr) ^2*Cm*1e-12)*1e9 % nH
Rm=30 % Ом
```

Рис. 2.25. Определение параметров кварцевого резонатора

Обратим особое внимание на размерность получаемых значений. После ввода названия переменной на схеме проверим соответствие ее размерности и положение переключателя Units элемента.

Выберем коэффициент обратной связи K . Его значение влияет на амплитуду напряжения на резонаторе и стабильность частоты. Рекомендуются значения от 0,2 до 1,0 [8, с. 252].

Затем выберем фактор регенерации G , определяющий запас по самовозбуждению. С его ростом увеличивается стабильность амплитуды, но возрастает уровень гармоник. Из компромиссных соображений фактор регенерации выбирают в пределах от 3 до 5. Для упрощения расчетов выбирать будем только целые значения.

Коэффициент Берга $\gamma_1(\theta) = 1/G$ позволяет определить угол отсечки и все остальные коэффициенты разложения косинусоидального импульса. Необходимые для расчета автогенератора значения приведены в таблице 2.2. [5, с. 411–415].

Таблица 2.2

Коэффициенты для расчета автогенератора

Показатели	Значения		
G	3	4	5
$\gamma_1(\theta)$	0,333	0,250	0,200
θ	74°	66°	60°
$\alpha_0(\theta)$	0,266	0,239	0,218
$\alpha_1(\theta)$	0,451	0,419	0,391

Добавим коэффициент обратной связи и фактор регенерации, выбрав их из рекомендуемого диапазона значений. Для выбора одного из возможных значений коэффициентов Берга используем условный оператор `if` так, как показано на рис. 2.26.

```
% выбор значений
K=0.4 % (0.2...1) коэффициент обратной связи
G=3 % (3 4 5) фактор регенерации
==if G==3
    Alf0=0.27
    Alf1=0.45
==elseif G==4
    Alf0=0.24
    Alf1=0.42
==else G==5
    Alf0=0.22
    Alf1=0.39
end
```

Рис. 2.26. Выбор коэффициента обратной связи и фактора регенерации

Определяем крутизну транзистора:

$$S = \frac{h_{21Э}}{r_b + \frac{h_{21Э}\phi_T}{I_{K0}} + (1 + h_{21Э})r_э}, \quad (2.7)$$

где ϕ_T — температурный потенциал, при рабочей температуре равен 0,026 В,

r_b — сопротивление базы,

$r_э$ — сопротивление эмиттера.

Вычисляем реактивные сопротивления емкостей C1 и C2:

$$X1 = \sqrt{\frac{Gr_m}{SK}}, \quad X2 = X1K. \quad (2.8)$$

Вычисляем значения емкостей на рабочей частоте:

$$C1 = \frac{1}{\omega X1}, \quad C2 = \frac{1}{\omega X2}. \quad (2.9)$$

Разделительную емкость определяем по следующей формуле:

$$C3 = \frac{10}{\omega R_э}. \quad (2.10)$$

Значение блокировочной индуктивности L_K зададим относительно небольшим, для частичной компенсации опережением по фазе:

$$L_K = \frac{5X1}{\omega}. \quad (2.11)$$

Добавим расчет по формулам (2.7–2.11) так, как показано на рис. 2.27. Для вычисления квадратного корня предназначена функция sqrt ().

```
S=h21e/(rb+(h21e*0.026/Ik0)+(1+h21e)*re)
x1=sqrt(G*Rm/(S*K))
x2=x1*K
C1=round(1/(Omega(Fr)*x1)*1e12) % pF
C2=round(1/(Omega(Fr)*x2)*1e12) % pF
C3=round(10/(Omega(Fr)*Re)*1e12) % pF
Lk=round(5*x1/Omega(Fr)*1e9) % nH
```

Рис. 2.27. Расчет реактивностей автогенератора

2.4. Энергетический расчет автогенератора

Определяем максимальную амплитуду коллекторного тока:

$$I_{\text{К МАКС}} = \frac{I_{\text{К0}}}{\alpha_0(\theta)}. \quad (2.12)$$

Проверяем условие, что она не превышает допустимое для транзистора значение: $I_{\text{К МАКС}} < I_{\text{К ДОП}}$.

Определяем амплитуду первой гармоники коллекторного тока:

$$I_{\text{К1}} = \alpha_1(\theta) I_{\text{К МАКС}}. \quad (2.13)$$

Вычисляем амплитуду напряжений на базе и коллекторе транзистора:

$$U_{\text{Б}} = \frac{I_{\text{К1}} G}{S}, \quad U_{\text{К}} = \frac{U_{\text{Б}} \sqrt{X1^2 + r_m^2}}{X2}. \quad (2.14)$$

Проверяем условие, что напряжение на коллекторе не превышает допустимое для транзистора значение: $E_{\text{КЭ}} + U_{\text{К}} < U_{\text{К ДОП}}$.

Определяем мощность, рассеиваемую кварцевым резонатором:

$$P_{\text{КВ}} = 0,5(U_{\text{Б}}/X2)^2 r_m. \quad (2.15)$$

Проверяем условие, что мощность не превышает допустимое значение мощности, рассеиваемой на кварцевом резонаторе: $P_{\text{КВ}} < P_{\text{КВ ДОП}}$. Для типовых кварцевых резонаторов в рассчитываемом диапазоне допускается мощность не более 2 мВт.

Определяем мощность, потребляемую от источника в коллекторной цепи:

$$P_0 = I_{\text{К0}} E_{\text{КЭ}}. \quad (2.16)$$

Вычисляем мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора:

$$P_{\text{К}} = P_0 - P_{\text{КВ}}. \quad (2.17)$$

Проверяем условие, что мощность не превышает допустимое значение мощности, рассеиваемой транзистором: $P_{\text{К}} < P_{\text{К ДОП}}$.

Добавим расчет по формулам (2.13–2.17) так, как показано на рис. 2.28. При проверке на превышение допустимых значений используем функцию warning (), выводящую предупреждение в поле ошибок.

```

% энергетический расчет
Ikmax=Ik0/Alf0
if Ikmax>Ikdop
    warning('Ik>dop')
end
Ik1=Alf1*Ikmax
Ub=Ik1*G/S
Uk=Ub*sqrt(x1^2+Rm^2)/x2
if (Eke+Uk)>Ukdop
    warning('Uk>dop')
end
Pkv=0.5*(Ub/x2)^2*Rm
if Pkv>0.002
    warning('Pkv>dop')
end
P0=Ik0*Eke
Pk=P0-Pkv
if Pk>Pkdop
    warning('Pk>dop')
end
end

```

Рис. 2.28. Энергетический расчет

После ввода всех уравнений и добавления их результатов в элементы получится схема, похожая на рис. 2.29.

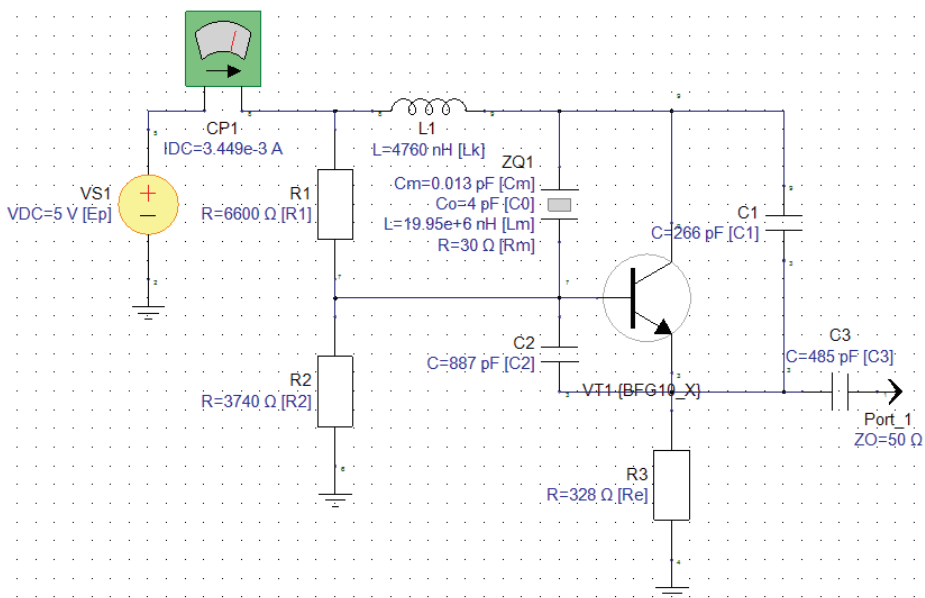


Рис. 2.29. Схема с рассчитанными элементами

2.5. Анализ схемы автогенератора

Добавим Transient анализ. Выберем для анализа схему Osc. Переходный анализ всегда начинается с 0, необходимо ввести только время его окончания. В окне свойств анализа (рис. 2.30) введем Stop time 20 ms. Чтобы улучшить качество данных уменьшим Maximum Step Size до 5 ns. Уменьшение позволит точнее определять частоты, но замедлит анализ. Для ускорения запуска автогенератора поставим галочку на Help oscillator start в поле начальных условий, это добавит имитацию шума реальной схемы. Остальные параметры оставим без изменений.

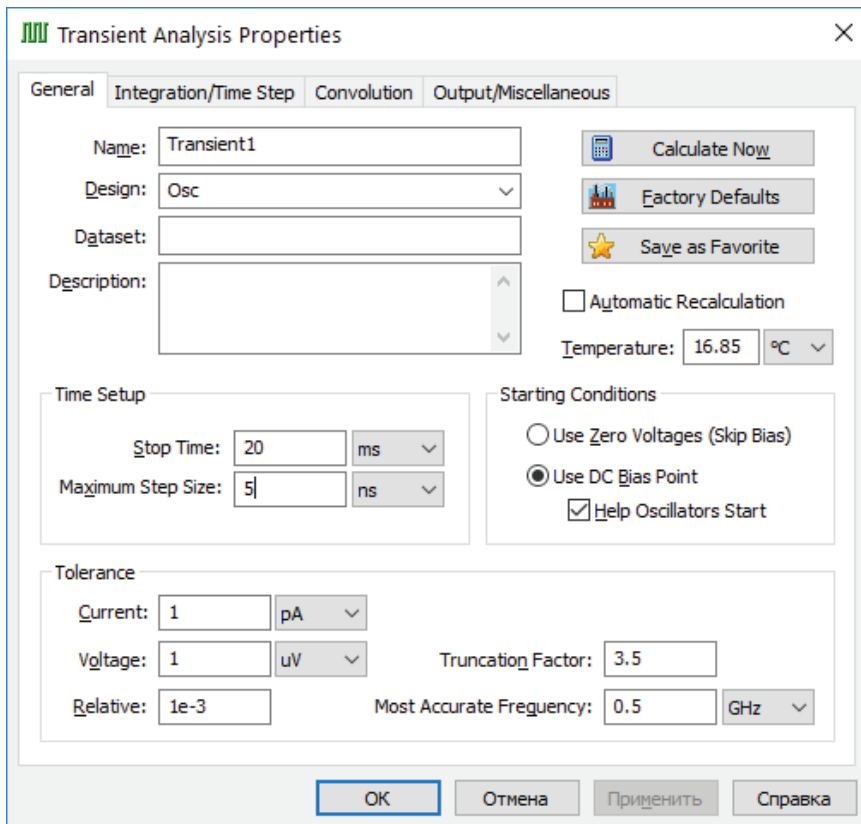


Рис. 2.30. Свойства временного анализа

На следующей закладке свойств Integration/Time step (рис. 2.31) для ускорения расчета автогенератора (с некоторым ухудшением качества

данных) выберем метод определения временного шага Controlled by Truncation Error (Approximate). Остальные параметры оставим без изменений.

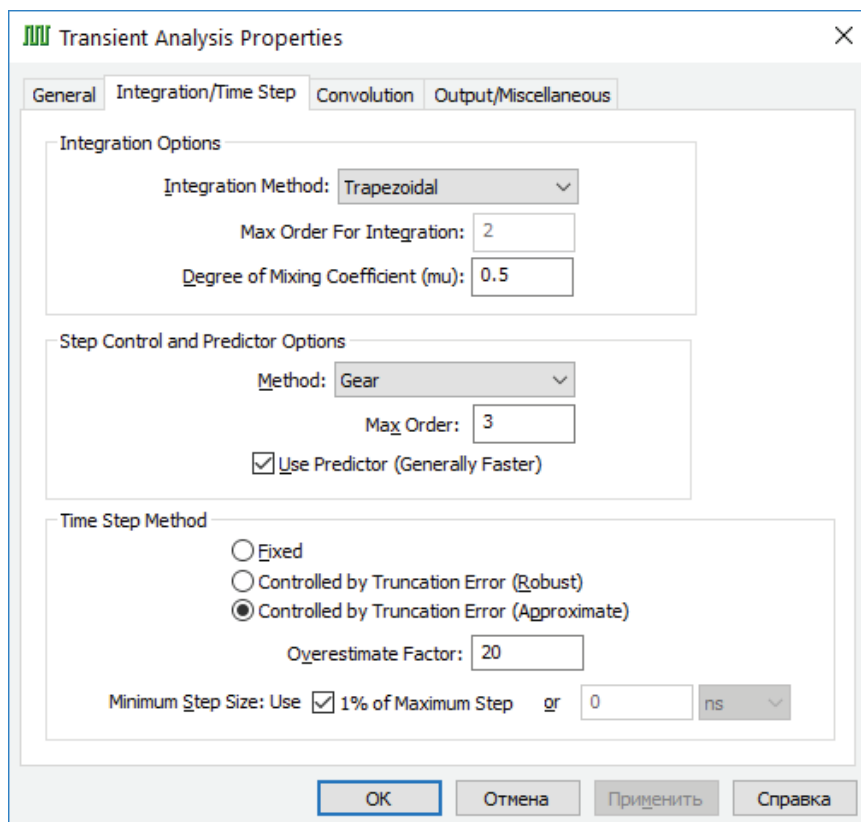



Рис. 2.31. Выбор метода определения временного шага

Запустим анализ, щелкнув  на панели инструментов. Расчет будет производиться довольно долго. Добавим график с результатами анализа. Для этого вызовем меню на выходном порту схемы и выберем пункт Add New Graph/Table (рис. 2.32).

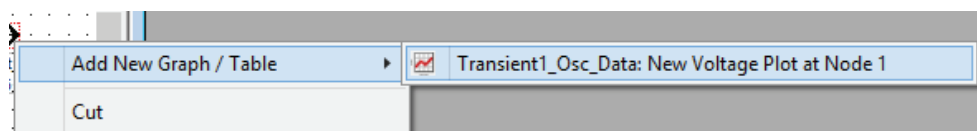


Рис. 2.32. Добавление графика с результатами временного анализа

На экране появится график напряжения на выходе автогенератора во временной области (рис. 2.33). На графике виден процесс самовозбуждения автогенератора с установлением колебаний в правой части (16...20 ms). Если колебания не устанавливаются к концу графика, то потребуется немного увеличить время анализа: в этом случае изменим в свойствах анализа Stop time на значение из диапазона 22...25 ms и, повторив расчет, проверим установление колебаний.

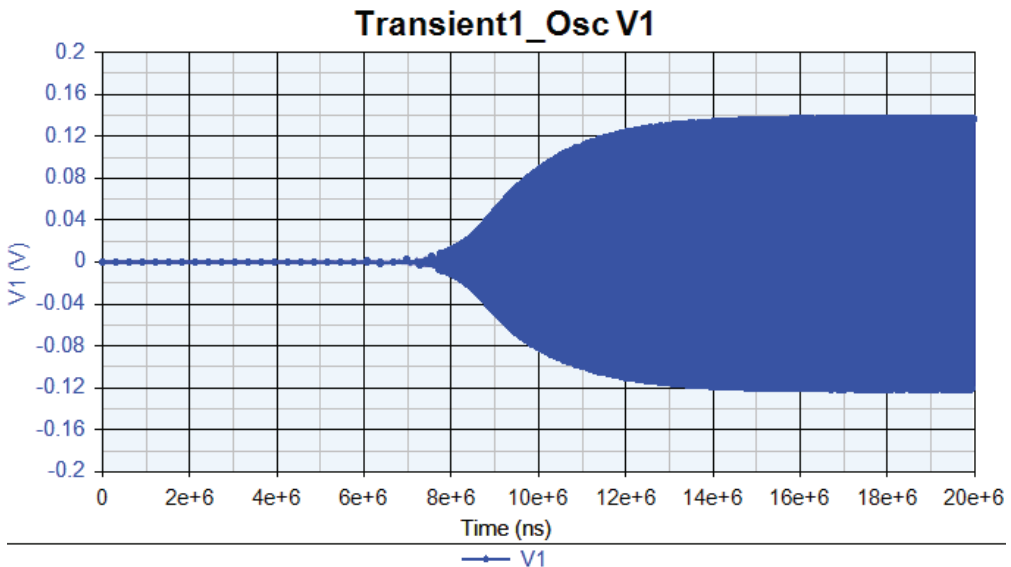


Рис. 2.33. Самовозбуждение автогенератора

Размер данных переходного процесса очень большой и файл займет много места, поэтому количество данных необходимо сократить. Для анализа в установившемся режиме требуется только последняя часть графика. Запись данных начала графика не нужна, поэтому откроем закладку в настройках переходного анализа Output/Miscellaneous и введем Output Start Time на 0.01 ms меньше введенного времени окончания и, сняв галочку, введем Output Step Size 1 ns (рис. 2.34). Запустим временной анализ иждедемся его окончания.

После расчета график отобразит колебания в установившемся режиме, в увеличенном виде показанные на рис. 2.35.

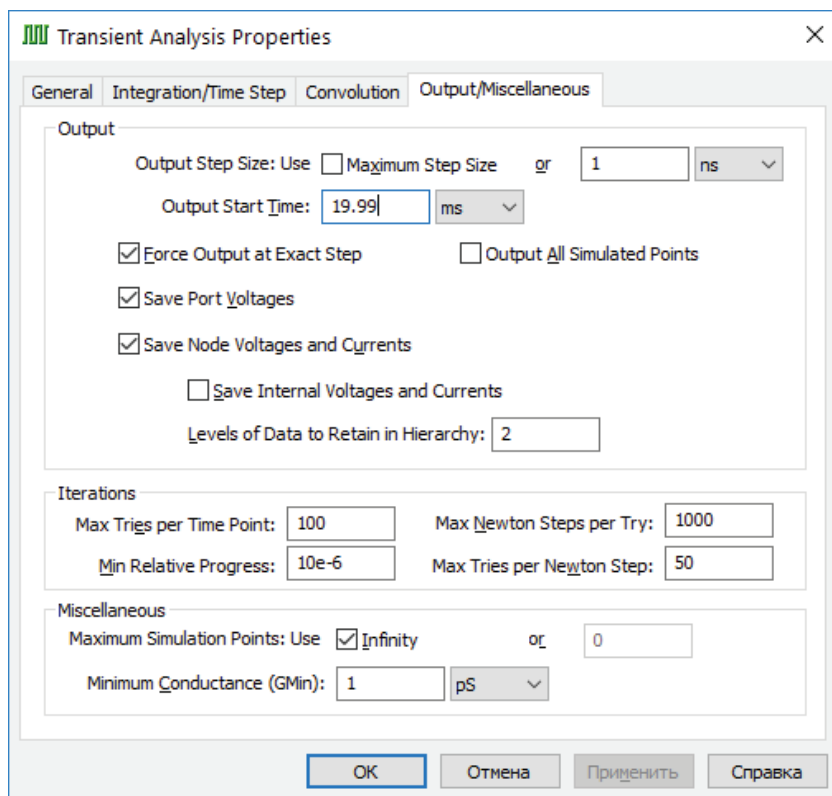


Рис. 2.34. Закладка выводимых данных

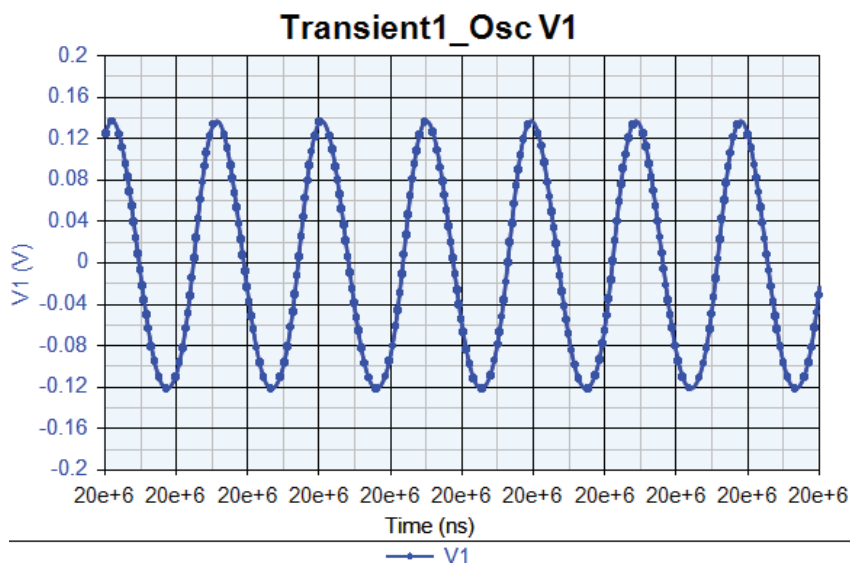


Рис. 2.35. Установившиеся колебания

Видно, что форма колебаний немного отличается от синусоидальной. Это показывает наличие в сигнале гармоник. Проанализируем спектр получившихся колебаний. Для этого добавим график, удалим автоматически создавшееся измерение, нажав на кнопку Remove, и в свойствах графика нажмем кнопку «Add». На экране появится мастер рядов графика (рис. 2.36). Выберем Spectrum и поставим галочку у строки VPORT.

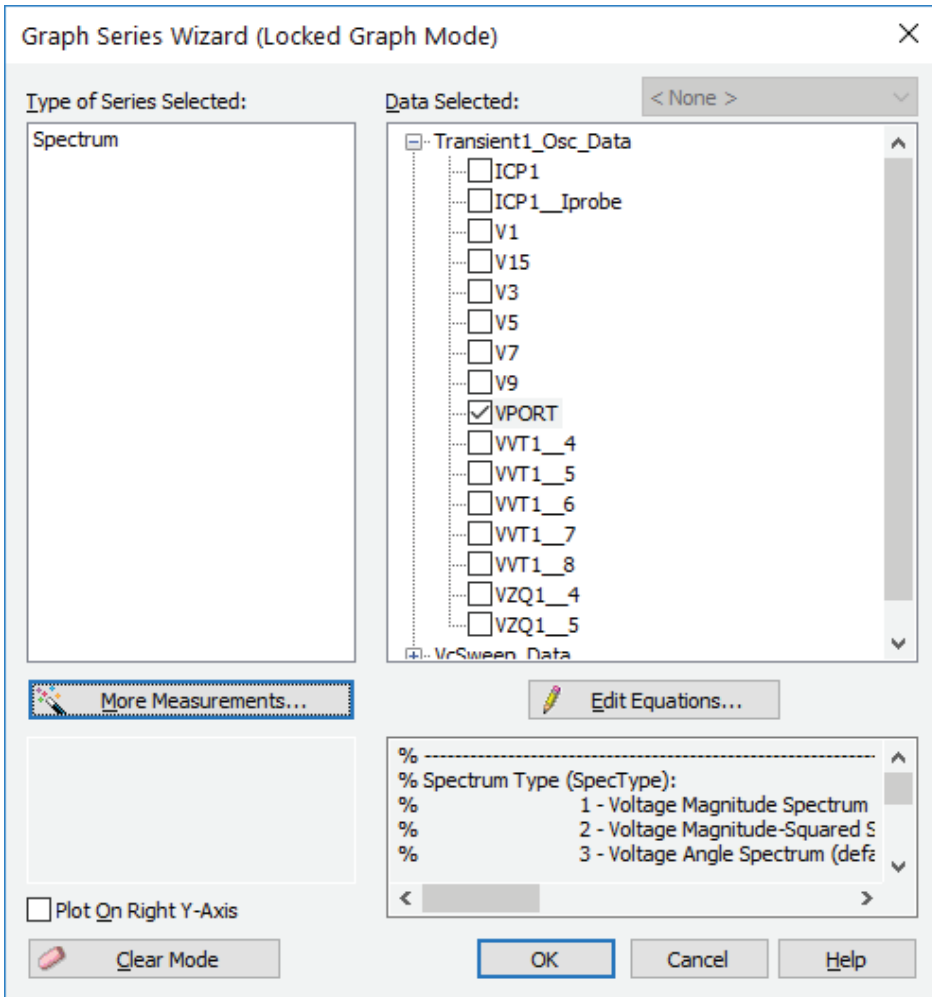


Рис. 2.36. Мастер рядов графика

Мастер подготовит уравнения расчета спектра. По умолчанию отображается мощность сигнала на сопротивлении 50 Ом. Для нашей зада-

чи более удобно анализировать спектр по уровню напряжения. Чтобы изменить тип спектра нажмем «Edit Equations...» и изменим значение переменной SpecType на 1 (напряжение) так, как показано на рис. 2.37.

```
% ENTER DESIRED GRAPH CHARACTERISTICS HERE
SpecType = 1;
```

Рис. 2.37. Изменение типа спектра

По умолчанию напряжение отображается в dBV (децибелы к 1 Вольту). Изменим единицы отображения напряжения, найдя вблизи конца уравнений строку с dBV и удалив в ней dB так, как показано на рис. 2.38.

```
if ( SpecType == 1 )    % Voltage Magnitude Spectrum
    setdisplayunit( 'Spec', 'V' );
```

Рис. 2.38. Изменение единиц отображения

Получится спектр напряжения на выходе автогенератора (рис. 2.39).

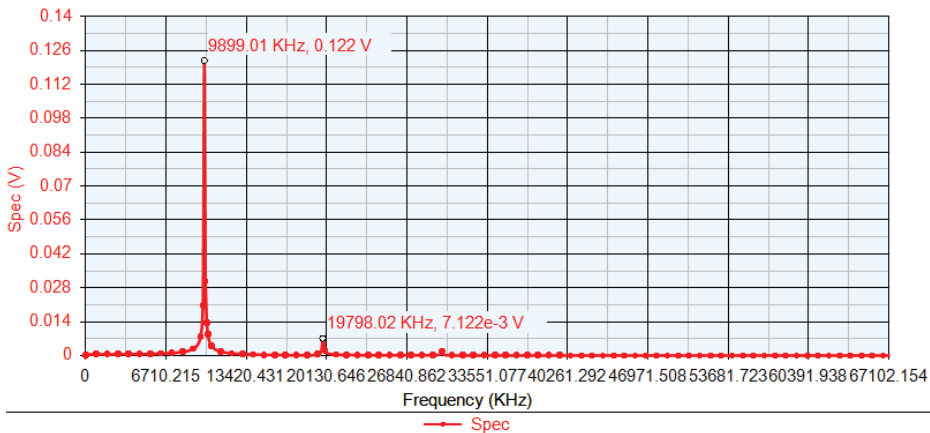


Рис. 2.39. Спектр колебаний на выходе автогенератора

На рис. 2.39 поставлены маркеры на значения первой и второй гармоник. Частота значительно меньше требуемой, так как анализ был ускорен выбором параметров и качество данных ухудшилось, что и сказалось на расчете спектра, но для предварительного анализа этого достаточно. Видно, что вторая гармоника почти в семнадцать раз меньше первой.

При изменении параметров схемы уровни гармоник изменяются. Необходимо оценить влияние на них коэффициента обратной связи и фактора регенерации. Коэффициент обратной связи может иметь произвольные значения, поэтому сделаем его настраиваемым, используя функцию `tune ()` в том месте уравнений, где мы определили эту переменную. Сузим задачу, приняв, что фактор регенерации может иметь только три целых значения — 3, 4 и 5. Поэтому мы будем изменять его прямо в тексте уравнений. После пересчета уравнений переменная K появится в поле настройки (рис. 2.40). Установим тип смены значений на Step Size и сделаем его равным 0,1.

Variable	Value
Step Size	0.1
Osc.K	0.5

Рис. 2.40. Настройка переменных

Оценим влияние фактора регенерации (выбирая другие допустимые значения) и коэффициента обратной связи (изменяя его на ± 0.1) на амплитуду выходного сигнала и уровень гармоник, проводя анализ после каждого изменения. Для оценки достаточно четырех — пяти комбинаций параметров. Если при пересчете возникли предупреждения о превышении допустимых значений, то следует выбрать другие значения.

Таблица 2.3

Результаты анализа параметров автогенератора

Комбинация параметров	K	G	U_1	U_2	U_1/U_2
1	0,4	3	122	7,1	17,2
2	0,5	3	114	7,1	16,0
3	0,3	3	134	7,4	18,1
4	0,3	4	160	8,8	18,8
5	0,4	5	168	9,7	17,3

Выберем лучшее отношение первой гармоники ко второй. Для указанного примера наилучшие значения получились при $K = 0,3$ и $G = 4$. Удалим настройку значений, стерев `tune ()` и оставив подобранные лучшие величины фактора регенерации и коэффициента обратной связи.

Настройка автогенератора закончена, можно переходить к ее практическому исполнению. Полученная схема автогенератора должна быть реализована с использованием реальных компонентов. Их номиналы должны соответствовать стандартным рядам номиналов элементов. Например, резистора $R2$ номиналом 3740 Ом в этих рядах нет, поэтому необходимо изменить эти значения к ближайшим стандартным, используя возможности программы. Для этого заменим в свойствах элементов названия переменных на полученные значения и сделаем их настраиваемыми. Например, в свойствах резистора $R2$ строку в ячейке Value ($R2$) заменим на получившееся значение (в примере 3740), и сделаем его настраиваемым — поставим галочку в ячейке Tune (рис. 2.41).

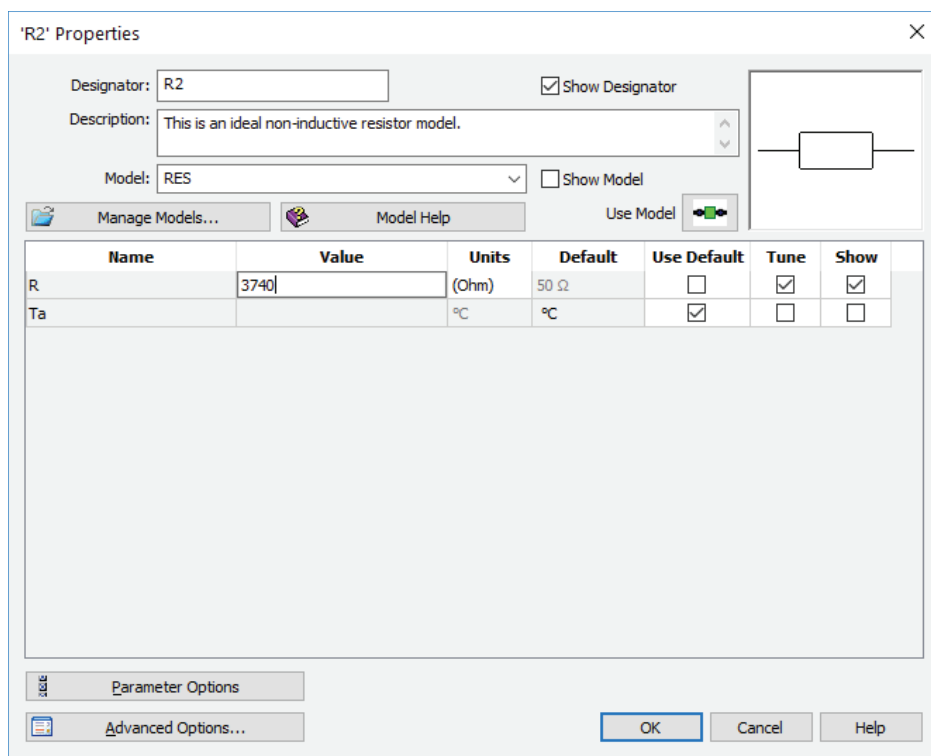



Рис. 2.41. Замена имени переменной на ее значение

Значение появится в поле настройки. Изменим тип смены значений на Standard Values, а его значение оставим равным 5 %, что соответствует ряду E24 (рис. 2.42).

Variable	Value
Standard Values ▾	5%
R2.R	3740 ▴ ▾

Рис. 2.42. Выбор стандартных номиналов элементов

Если теперь изменять это значение, нажимая стрелочки в правой части ячейки, будут выбираться стандартные значения по ряду E24. Для нашего примера соседние стандартные значения: 3600 и 3900 Ом. Выбираем ближайшее значение, у нас это 3600 Ом.

Аналогично подберем стандартные номиналы для всех резисторов, индуктивностей и емкостей. Номиналы источника питания, кварцевого резонатора и выходного порта оставим расчетными. Можно выделить все нужные элементы и сделать их настраиваемыми, выбрав значок  на панели инструментов.

Для разработки следующих узлов нам потребуются данные колебаний, полученных на выходе автогенератора. Чтобы не повторять анализ, сохраним массив данных колебаний на выходе. Для этого вызовем в рабочем дереве меню данных (Transient1_Osc_Data) и выберем пункт Export (рис. 2.43).

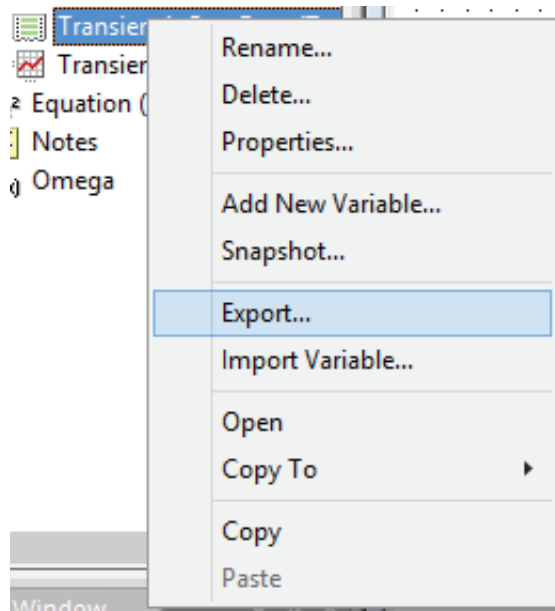


Рис. 2.43. Сохранение данных автогенератора

Появится диалог выбора названия файла с расширением xml. Сохраним файл в свою рабочую директорию.

2.6. Контрольные вопросы

1. Какая относительная нестабильность частоты автогенераторов с кварцевым резонатором?
2. Какие языки программирования используются в Genesys?
3. Где расположены уравнения, связанные со схемой?
4. Как выбирают номинал сопротивления автосмещения?
5. Почему необходимо использовать стандартные напряжения питания?
6. Для каких целей используются функции в программе?

3. Разработка умножителя частоты

Вырабатываемая автогенератором частота обычно меньше требуемой и ее необходимо увеличить (умножить) на требуемую величину. Умножитель частоты создадим на основе генератора с внешним возбуждением, работающего в режиме с отсечкой. Такой режим добавляет в выходной ток дополнительные гармоники. Нужную гармонику выделим настроенным на нее контуром, включенным на выходе каскада. Для повышения выходной мощности выбирается оптимальный угол отсечки $\theta = 120^\circ/n$, где n — коэффициент умножения. С ростом n сильно уменьшается амплитуда гармоники, поэтому умножители работают с n не более 3, а требуемое значение частоты достигается увеличением их числа. Разработаем умножитель на 2, приведенный на рис. 3.1.

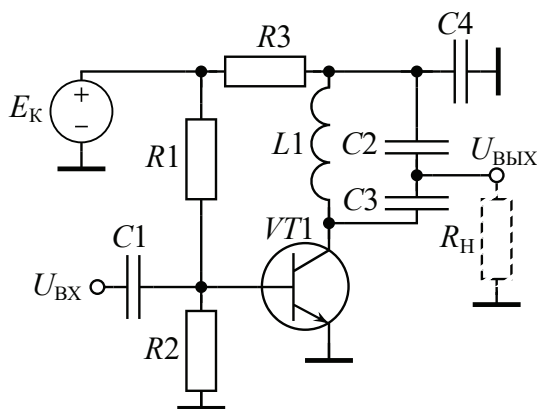


Рис. 3.1. Схема умножителя

На транзисторе $VT1$ собран умножитель. Входное напряжение с частотой f через разделительный конденсатор $C1$ поступает на базу транзистора $VT1$. Питание на коллектор подается через резистор $R3$ с блокировочной емкостью $C4$, а смещение на базе задают резисторы $R1$, $R2$. Нагрузкой транзистора является резонансный контур $L1$, $C2$, $C3$, настроенный на выходную частоту $2f$. Нагрузка подключается к части контура, чтобы снизить влияние на его добротность.

Расчет умножителя [6, с. 271] состоит из:

- расчета коллекторной цепи умножителя: токов, напряжений коллектора и элементов нагрузки;
- расчета входной цепи умножителя: токов, напряжений базы.

После расчета будет рассмотрен процесс создания схемы умножителя и анализ его характеристик. Входные данные для расчета умножителя получим из результатов разработки автогенератора.

3.1. Определение входных данных умножителя

Создадим новый проект. Переименуем автоматически созданную схему Sch1 в Mul. Добавим в проект модель транзистора, который использовался при разработке автогенератора, и функцию Omega, аналогично схеме автогенератора. Сохраним проект, выбрав каталог и название, например, lab3.

Для того, чтобы рассчитать умножитель надо подать на вход полученный в предыдущей работе сигнал от автогенератора: необходим файл выходных данных автогенератора. Для этого импортируем его. В контекстном меню проекта зайдём в пункт Import—XML File (рис. 3.2) и выберем соответствующий файл, созданный в предыдущей работе.

В дереве проекта появится набор данных. Откроем его (рис. 3.3). Проверим, какие данные относятся к выходному порту автогенератора, и запишем название переменной. В примере на рис. 3.3 — это V1.

Из этих данных нам необходим сигнал, сдвинутый к началу, который подадим на вход умножителя. Извлечем его с помощью уравнений в программе. Для этого в уравнениях проекта (Equation, расположенное в дереве рабочей области) переключим режим на MATLAB и добавим строки по образцу, приведенному на рис. 3.4. Пример выражений приведен в Приложении 3.

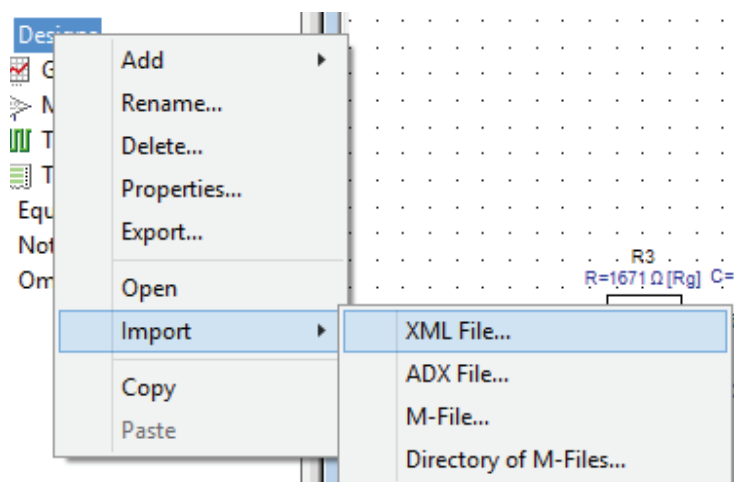


Рис. 3.2. Импортрование выходных данных предыдущего каскада

Transient1_Osc_Data

Variable	Index	T (ns)	VPORT (V)
ICP1__lprobe	1	24.99e+6	-0.377
ICP1=[ICP1...	2	24.99e+6	-0.398
LogOutput...	3	24.99e+6	-0.414
T	4	24.99e+6	-0.427
V1	5	24.99e+6	-0.436
V15	6	24.99e+6	-0.439
V3	7	24.99e+6	-0.441
V5	8	24.99e+6	-0.44
V7	9	24.99e+6	-0.435
V9	10	24.99e+6	-0.426
VPORT=[V1]	11	24.99e+6	-0.414
VVT1__Ne...	12	24.99e+6	-0.401
VVT1__Ne...	13	24.99e+6	-0.385
VVT1__Ne...	14	24.99e+6	-0.368
VVT1__Ne...	15	24.99e+6	-0.349
VVT1__Ne...	16	24.99e+6	-0.328
VZQ1__4			
VZQ1__5			
ZPORT			

Variable: VPORT
Real Array[10001, 1]

Рис. 3.3. Данные автогенератора

```
using('Transient1_Osc_Data') % используем выходные данные автогенератора
VOsc=V1 % извлекаем форму сигнала
TOsc=T-T(1) % и время, сдвигая к 0
setindep('VOsc','TOsc')
```

Рис. 3.4. Извлечение данных входного сигнала

В первой строке задается название набора данных, введем в него название импортированных данных. В следующих строках извлекаются форма сигнала (из переменной порта) и время, которое сдвигается в начало. Затем форма и время связываются. После расчета уравнений в Workspace Variables появятся извлеченные данные.

3.2. Расчет коллекторной цепи умножителя

Исходными данными при расчете являются постоянный ток коллектора I_{K0} и напряжение питания $E_{П}$. Первоначальный ток коллектора и напряжение питания используем такие же, как у автогенератора.

Для расчетов элементов применим уравнения, связанные со схемой. Пример выражений приведен в Приложении 4. Введем исходные данные удвоителя и параметры транзистора (рис. 3.5).

```
% Исходные данные
% Вариант № 0
Fr=10 % входная частота в МГц
Fr2=Fr*2 % выходная частота в МГц
Ep=5
Ik0=3e-3 % ток коллектора (2...5)mA

% транзистор BFG10
h21e=66
rnas=7.5
rb=3.5
re=0.22
Ikdop=0.25
Ukdop=20
Pkdop=0.4
```

Рис. 3.5. Исходные данные для удвоителя

Рассчитаем максимальный ток коллектора:

$$I_{\text{К МАКС}} = \frac{I_{\text{К0}}}{\alpha_0(\theta)}, \quad (3.1)$$

где $\alpha_0(\theta)$ — коэффициент, определяющий отношение постоянного тока коллектора к величине импульса тока коллектора. Для $\theta = 60^\circ$ коэффициент $\alpha_0(\theta) = 0,218$.

Проверяем условие, что максимальный ток не превышает допустимое для транзистора значение: $I_{\text{К МАКС}} < I_{\text{К ДОП}}$.

Определяем вторую гармонику тока коллектора:

$$I_{\text{К2}} = I_{\text{К МАКС}} \alpha_2(\theta), \quad (3.2)$$

где $\alpha_2(\theta)$ — коэффициент, определяющий отношение второй гармоники тока коллектора к величине импульса тока коллектора. Для $\theta = 60^\circ$ коэффициент $\alpha_2(\theta) = 0,276$.

Сопротивление резистора в коллекторной цепи R_3 выберем равным 100 Ом. За вычетом падения на нем, напряжение на коллекторе получается:

$$E_{\text{К}} = E_{\text{П}} - 100 I_{\text{К0}}. \quad (3.3)$$

Определяем вторую гармонику напряжения на коллекторе в граничном режиме:

$$U_{\text{К2}} = E_{\text{К}} - I_{\text{К МАКС}} \cdot r_{\text{НАС}}, \quad (3.4)$$

где $r_{\text{НАС}}$ — сопротивление насыщения.

Проверяем условие, что напряжение на коллекторе не превышает допустимое для транзистора значение: $E_{\text{К}} + U_{\text{К2}} < U_{\text{К ДОП}}$.

Находим потребляемую, полезную и рассеиваемую мощность:

$$P_0 = E_{\text{К}} I_{\text{К0}}, \quad P_2 = 0,5 U_{\text{К2}} I_{\text{К2}}, \quad P_{\text{С}} = P_0 - P_2. \quad (3.5)$$

Проверяем, что рассеиваемая мощность не превышает допустимое для транзистора значение $P_{\text{С}} < P_{\text{К ДОП}}$.

Добавим расчет по формулам (3.1–3.5) так, как показано на рис. 3.6.

Определяем требуемое сопротивление коллекторной нагрузки для транзистора:

$$R_{\text{К}} = \frac{U_{\text{К2}}}{I_{\text{К2}}}. \quad (3.6)$$

```

% расчет коллекторной цепи
Teta=60
Alf0=0.218
Alf2=0.276
Ikmax=Ik0/Alf0
if (Ikmax)>Ik dop
    warning('Ik>dop')
end
Ik2=Ikmax*Alf2
Ek=Ep-100*Ik0
Uk2=Ek-Ikmax*rnas
if (Ek+Uk2)>Ukdop
    warning('Uk>dop')
end
P0=Ek*Ik0
P2=0.5*Ik2*Uk2
Ps=P0-P2
if (Ps)>Pk dop
    warning('Pk>dop')

```

Рис. 3.6. Расчет коллекторной цепи умножителя

Этой нагрузкой для транзистора является контур с подключенной к нему нагрузкой. Для расчета элементов контура используем эквивалентные преобразования параллельных цепей в последовательные и наоборот, как показано на рис. 3.7.

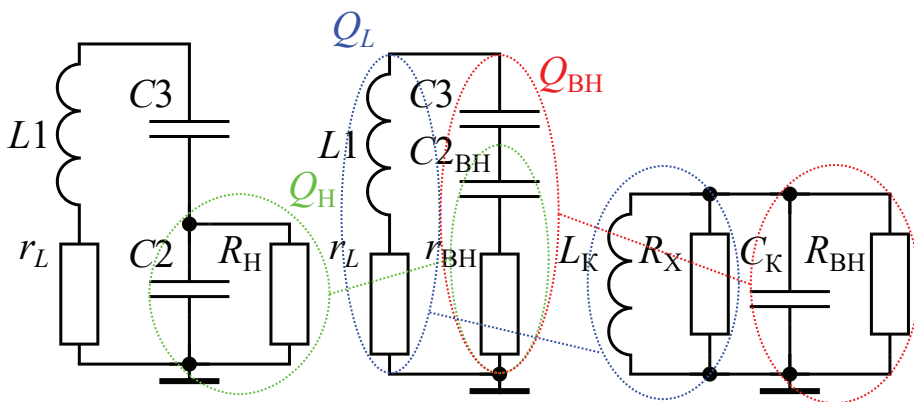


Рис. 3.7. Преобразования к расчету элементов контура

Основные потери в контуре исследуемого диапазона происходят в индуктивности, поэтому добротность контура определяется добротностью индуктивности. Добротность современных миниатюрных ра-

диочастотных индуктивностей линейно зависит от частоты и обычно составляет минимум 25 на частоте 25 МГц. Поэтому добротность для выходной частоты $2f$ можно определить, как

$$Q_L = \frac{25}{25 \cdot 10^6} \cdot 2f = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 2f. \quad (3.7)$$

Характеристическое сопротивление контура ρ для нашего диапазона рекомендуется выбирать равным 100, и по нему можно определить индуктивность

$$L1 = \frac{\rho}{\omega_2}, \quad (3.8)$$

где ω_2 — выходная угловая частота, $\omega_2 = 2\pi \cdot 2f$.

Контур должен быть настроен на выходную частоту. Используя формулу Томсона с учетом преобразования индуктивности, определяется значение емкости контура:

$$C_K = \frac{1}{\omega_2^2 L1(1 + 1/Q_L^2)}. \quad (3.9)$$

Нагрузку можно определить как параллельное соединение двух сопротивлений — сопротивления ненагруженного контура и пересчитанного к зажимам контура сопротивления нагрузки. Находим их значения:

$$R_X = \frac{\rho}{Q_L}(1 + Q_L^2), \quad R_{BH} = \frac{R_K R_X}{R_X - R_K}. \quad (3.10)$$

Определяется добротность и значение вносимого в контур последовательного сопротивления:

$$Q_{BH} = \omega_2 C_K R_{BH}, \quad r_{BH} = \frac{R_{BH}}{(1 + Q_{BH}^2)}. \quad (3.11)$$

Примем входное сопротивление следующего каскада (R_H для удвоителя) равным стандартному значению 50 Ом. Добротность нагрузки и емкость, подключенную к ней, можно определить по соотношениям:

$$Q_H = \sqrt{\frac{R_H}{r_{BH}} - 1}, \quad C2 = \frac{Q_H}{\omega_2 R_H}. \quad (3.12)$$

Рассчитываем вторую емкость делителя:

$$C3 = \frac{1}{\omega_2 r_{BH} (Q_{BH} - Q_H)}. \quad (3.13)$$

Определяем минимальное значение блокировочной емкости, сопротивление которой должно быть значительно меньше сопротивления контура:

$$C4 = \frac{100}{\omega_2 R_K}. \quad (3.14)$$

Добавим расчет по формулам (3.6–3.14) так, как показано на рис. 3.8.

```
% расчет нагрузки
Rk=Uk2/Ik2
QL=1*Fr2 % добротность
ro=100 % характеристическое сопротивление
L1=round(ro/Omega(Fr2)*1e9) % nH
Ck=1/(Omega(Fr2)^2*L1*(1+1/(QL^2))*1e-9)
Rx=ro/QL*(1+QL^2)
Rvn=Rk*Rx/(Rx-Rk)
Qvn=Omega(Fr2)*Ck*Rvn
rvn=Rvn/(1+Qvn^2)
Rn=50 % выходное сопротивление
Qn=sqrt(Rn/rvn-1)
C2=round(Qn/(Omega(Fr2)*Rn)*1e12) % pF
C3=round((1/(Omega(Fr2)*rvn*(Qvn-Qn)))*1e12) % pF
C4=round(100/(Omega(Fr2)*Rk)*1e9) % nF
```

Рис. 3.8. Расчет коллекторной нагрузки

3.3. Расчет входной цепи умножителя

Определяется напряжение возбуждения на базе:

$$U_B = \frac{I_{K \text{ МАКС}}}{S(1 - \cos(\theta))}. \quad (3.15)$$

где S — крутизна транзистора, определяется по формуле (2.7):

$$S = \frac{h_{21\Theta}}{r_B + \frac{h_{21\Theta}\Phi_T}{I_{K0}} + (1 + h_{21\Theta})r_{\Theta}}.$$

Затем находим напряжение смещения:

$$E_B = E' - U_B \cos(\theta), \quad (3.16)$$

где E' — напряжение отсечки, для кремниевых транзисторов, равное 0,7 В.

Определяется постоянный ток базы:

$$I_{B0} = \frac{I_{K0}}{h_{21Э}}. \quad (3.17)$$

Ток делителя базовой цепи умножителя выбирается также, как и для автогенератора по формуле (2.4) $I_{ДЕЛ} = 10 I_{B0}$. Номиналы резисторов $R1$ и $R2$ определяются, используя выражения:

$$R1 = \frac{E_{П} - E_{Б}}{I_{ДЕЛ} + I_{B0}}, \quad R2 = \frac{E_{Б}}{I_{ДЕЛ}}. \quad (3.18)$$

Разделительная емкость $C1$ передает сигнал входной частоты и определена в главе 2 (там она обозначена как $C3$).

Добавляем расчет входной цепи и делителя по формулам (3.15–3.18) так, как показано на рис. 3.9.

```
% расчет входной цепи
S=h21e/(rb+(h21e*0.026/Ik0)+(1+h21e)*re)
Ub=Ikmax/(S*(1-cosd(Teta)))
Eb=0.7-Ub*cosd(Teta)
Ib0=Ik0/h21e
% входной делитель
Idel=10*Ib0
R1=round((Ep-Eb)/(Idel+Ib0))
R2=round(Eb/Idel)
```

Рис. 3.9. Расчет входной цепи умножителя

3.4. Создание схемы умножителя

Установим элементы умножителя на поле схемы. На входе добавим источник переменного напряжения. Его амплитуду приравняем рассчитанному напряжению на базе. Для определения выходного тока в коллекторную цепь установим датчик тока.

В параметры индуктивности контура добавим значение добротности, частоту и установим закон изменения добротности (Mode) пропорционально частоте, как показано на рис. 3.10. Можно поставить у добротности и частоты галочки в колонке Show для отображения на поле схемы.

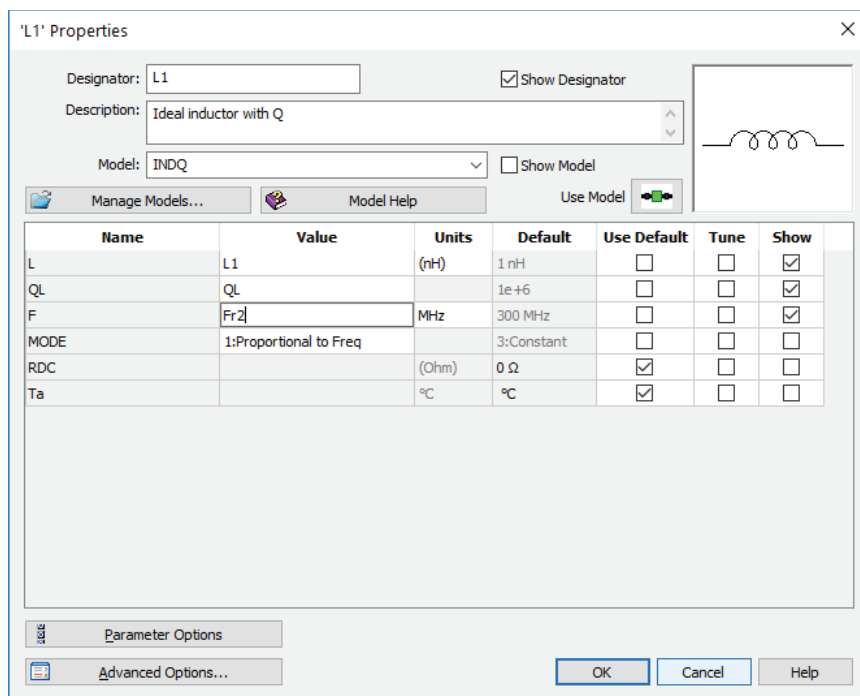


Рис. 3.10. Добавление значения добротности

Получается схема, подобная изображенной на рис. 3.11.

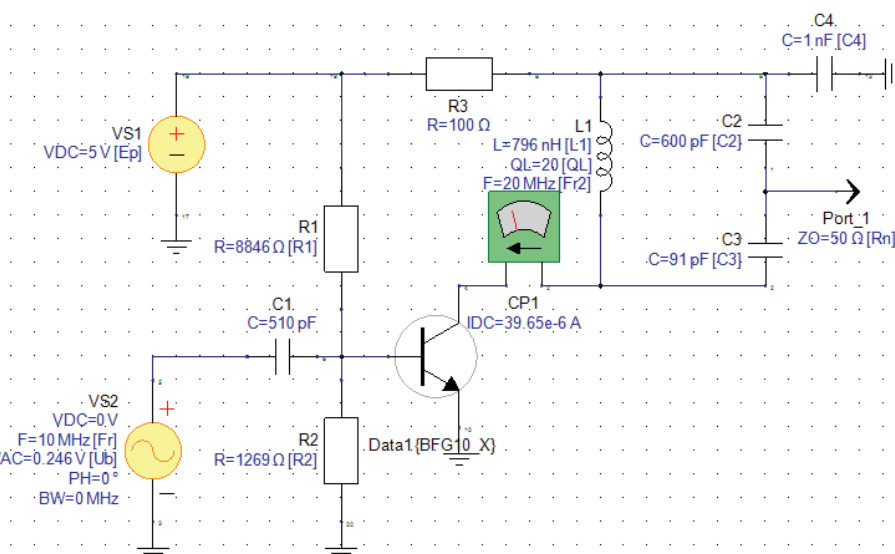


Рис. 3.11. Схема умножителя для подстройки

3.5. Анализ схемы умножителя

Добавим временной анализ с параметром Stop Time равным 10000 ns, уменьшим Maximum Step Size до 5 ns и установим запись данных в конце (от 8000 ns) с шагом 1 ns. Запустим анализ.

Если возникает ошибка с определением подходящего шага, следует уменьшить шаг или увеличить погрешность в свойствах временного анализа.

Добавим графики спектров напряжения на контуре и тока коллектора и отметим частоты гармоник (рис. 3.12).

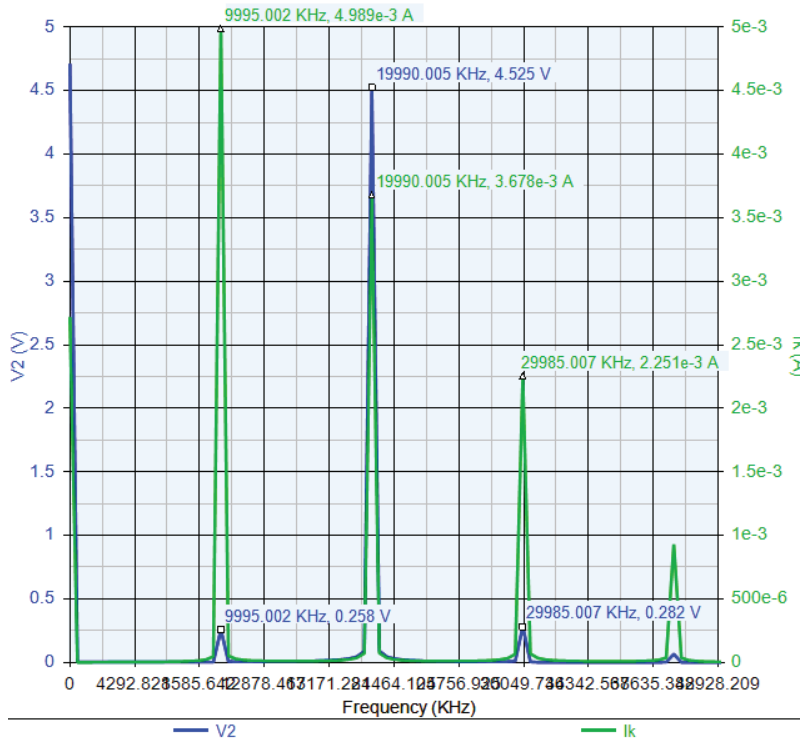


Рис. 3.12. Напряжение и ток коллектора по окончании переходных процессов

При правильно собранной схеме напряжение на контуре и ток коллектора должны быть близки к расчетным.

Проверим угол отсечки в выходном токе, добавив график тока коллектора и измерив разницу между маркерами на краях импульса тока (рис. 3.13).

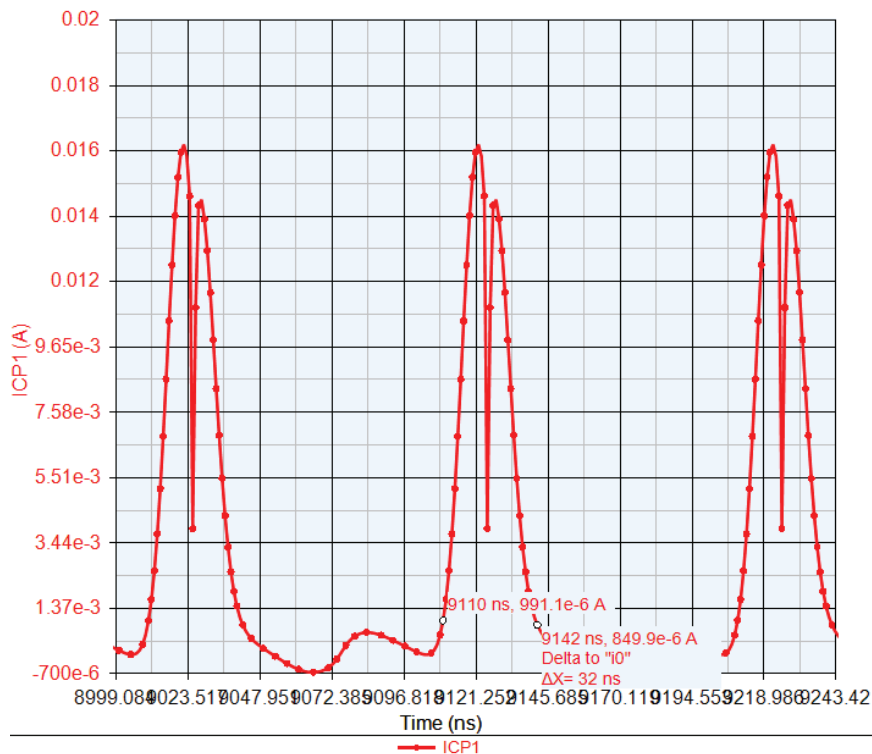


Рис. 3.13. Форма выходного тока

Для примера на рис. 3.13 угол отсечки $\theta = 180^\circ \cdot 32/100 = 58^\circ$, что близко к требуемому для удвоителя.

Подключим на вход умножителя входной порт с настраиваемой формой сигнала (Input: Custom Voltage Waveform). В его свойствах занесем полученные данные (время и напряжение) сигнала от автогенератора (рис. 3.14).

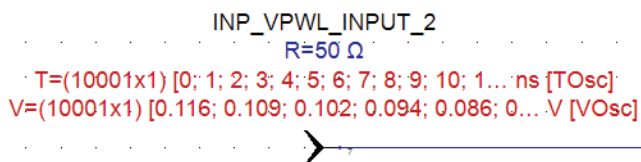


Рис. 3.14. Подключение входного сигнала от автогенератора

Повторим анализ и сравним полученные результаты с предыдущими значениями (рис. 3.12 и 3.13). Так как сигнал автогенератора содержит вторую гармонику, и его амплитуда не совпадает с расчетной, то результаты изменятся. Если сильно изменилась амплитуда выходного напряжения, можно изменить номинал резистора $R2$ и приблизить напряжение на коллекторе к расчетному. При изменениях требуется контролировать уровень паразитных гармоник.

Изменим значения номиналов элементов в схеме к ближайшим стандартным (таким же методом, как в автогенераторе). Запустим анализ и проверим выходные сигналы.

3.6. Контрольные вопросы

1. Для какой цели используется умножитель частоты?
2. Какой оптимальный угол отсечки для удвоителя?
3. Почему сопротивление нагрузки выбирается равным 50 Ом?
4. Почему ток делителя базовой цепи в 10 раз больше базового тока?
5. Какой метод используется для расчета элементов контура удвоителя?

4. Проектирование возбудителя частоты

Возбудитель частоты формирует колебание с нужным номинальным значением из опорной стабильной частоты. Разработаем неперестраиваемый возбудитель с прямым синтезом частоты, в котором выходной сигнал формируется путем преобразования исходного опорного колебания и выделением нужного колебания пассивным фильтром, поскольку он отличается простотой своей реализации. Структурная схема возбудителя приведена на рис. 4.1.

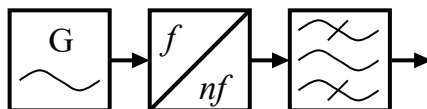


Рис. 4.1. Структурная схема пассивного возбудителя частоты

Сформированный автогенератором сигнал подается на умножитель, который переносит частоту сигнала вверх. Используем автогенератор и удвоитель из предыдущих глав. Паразитные спектральные составляющие, оставшиеся на выходе умножителя, подавим с помощью фильтра. Коэффициент подавления определяется по формуле:

$$D = 10 \lg(P_{\text{вых}} / P_{\text{п}}),$$

где $P_{\text{вых}}$, $P_{\text{п}}$ — мощности рабочего и паразитного излучений на выходе возбудителя. По существующим нормам он должен быть более 50 дБ. Таким образом, при проектировании возбудителя частоты будет разработана его схема, схема полоскового фильтра и печатная плата.

4.1. Разработка схемы возбудителя частоты

Создадим новый проект. Переименуем автоматически созданную схему Sch1 в All. Сохраним проект, выбрав свой каталог и название, например, lab4.

Добавим в проект модель транзистора, аналогично предыдущим работам. Установим элементы автогенератора и умножителя на поле схемы. Используем для этого результаты сделанных работ, копируя необходимые части схем. Удалим промежуточные порты и соединим выход автогенератора со входом умножителя.

При необходимости перенумеруем элементы слева — направо и сверху — вниз, с учетом функционального разбиения на узлы. Для этого выделим требующие изменения порядка элементы и выберем пункт меню Schematic-Reapply Auto-designators. Получится схема, подобная показанной на рис. 4.2.

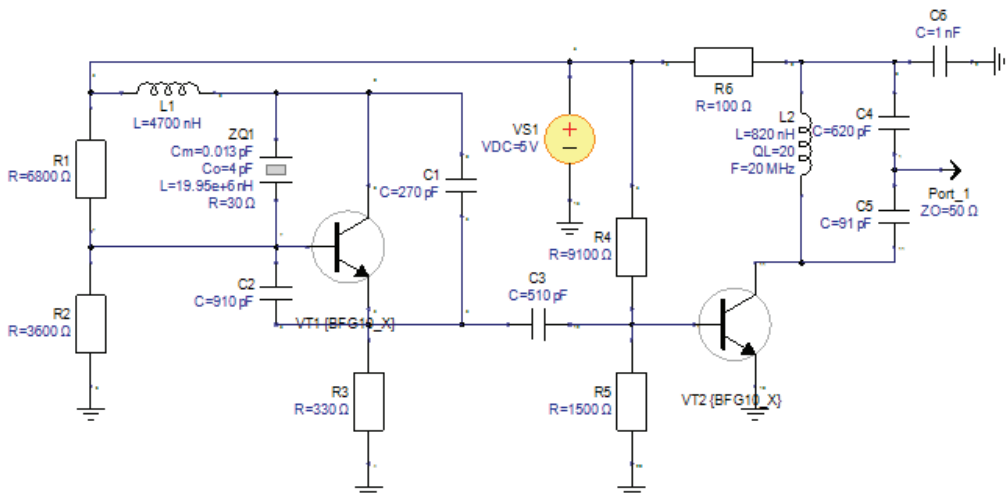


Рис. 4.2. Схема соединения автогенератора и умножителя

Добавим временной анализ для схемы по образцу анализа автогенератора (с такими же временными параметрами). Запустим анализ и дождемся его окончания. Если анализ прерывается ошибкой, то следует уменьшить Maximum Step Size до 1...2 ns. Добавим графики спектра выходного сигнала, у одного, оставив единицы измерения dB, а у второго, изменив их на V, как на рис. 4.3.

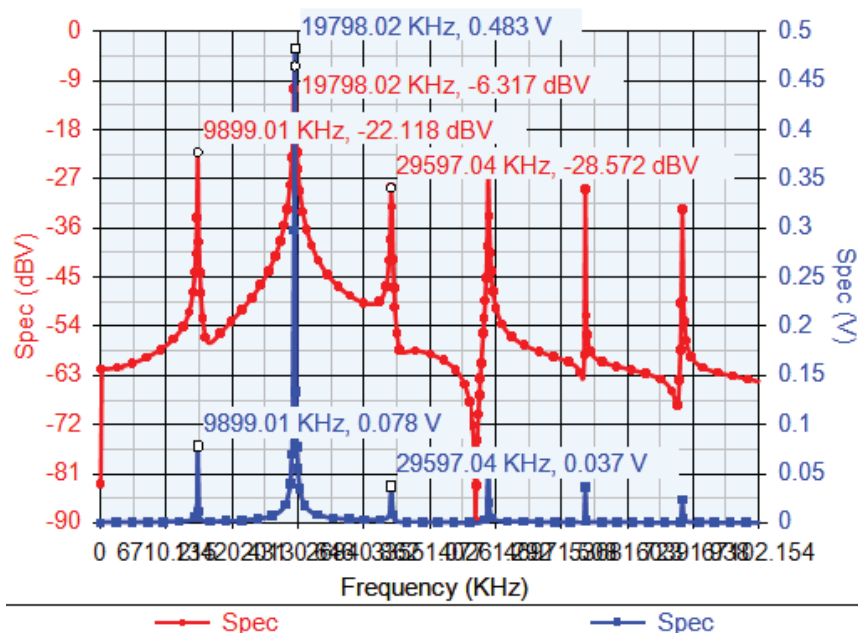


Рис. 4.3. Спектр сигнала на выходе умножителя

На графике видно, что уровень побочного колебания на 16 дБ меньше уровня требуемой гармоники. По современным требованиям уровень побочных колебаний должен быть гораздо меньше, поэтому на выход умножителя необходимо добавить частотно-селективное устройство — полосовой фильтр.

4.2. Разработка полосового фильтра

Для создания полосно-пропускающего фильтра воспользуемся подпрограммой синтеза Passive Filter, входящей в состав Genesys. В дереве рабочей области щелкнем правой кнопкой мыши на пункте Designs, после во всплывающем меню выберем Add — Syntheses — Passive Filter, как показано на рис. 4.4.

Введем название файла BF вместо Filter 1. В качестве начальных настроек следует выбрать Factory Default Values (рис. 4.5).

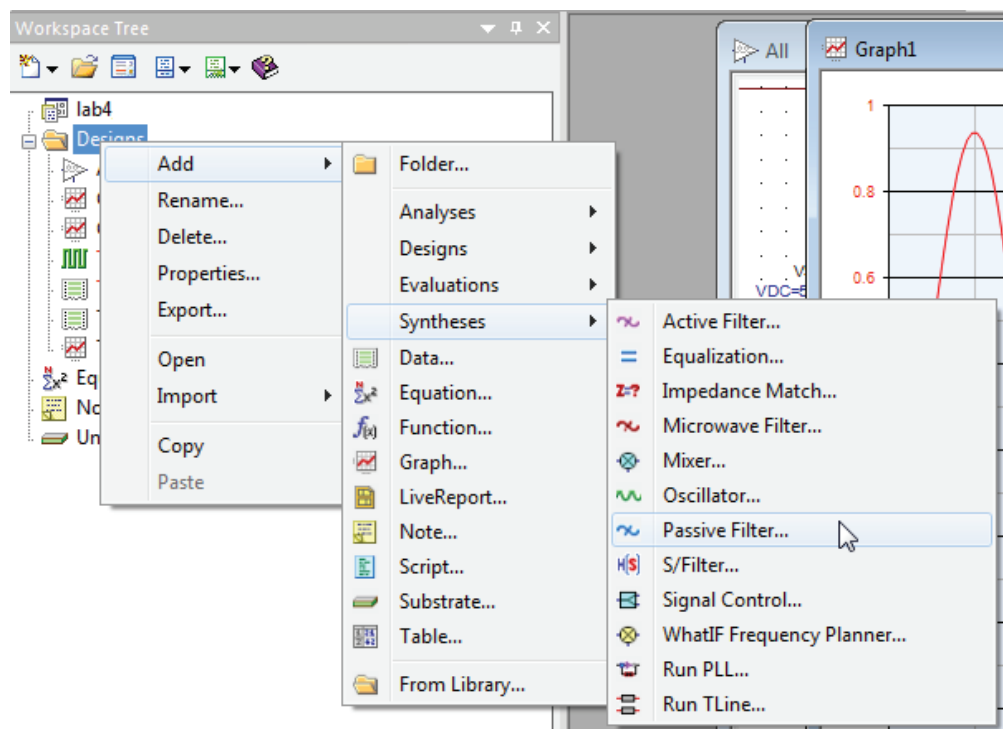


Рис. 4.4. Выбор подпрограммы синтеза фильтров

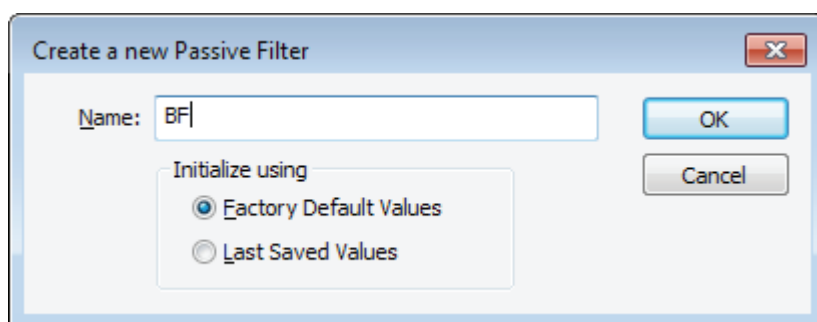


Рис. 4.5. Создание нового проекта синтеза фильтров

В выпадающем списке *Type* выберем *Bandpass* для создания полосового фильтра. В качестве *Shape* аппроксимации следует оставить *Chebyshev*, а *Subtype* выбрать *Minimum Capacitor* (рис. 4.6).

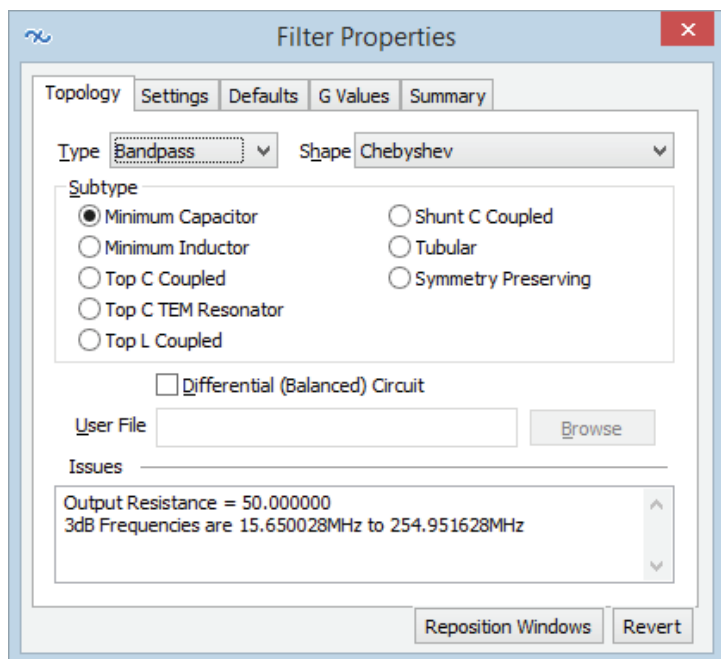


Рис. 4.6. Окно выбора типа фильтра

Перейдем на вкладку Settings. В качестве Lower Freq Cutoff и Upper Freq Cutoff введем значения ± 1 МГц от частоты настройки умножителя частоты $2f$. Затем нажмем на кнопку Estimate Order для вызова окна определения порядка фильтра. В верхней части окна показан тип и аппроксимация выбранного фильтра, в средней расположены окна значений параметров полосы пропускания (Passband Ripple, Cutoff Attenuation, Lower Cutoff Freq, Upper Cutoff Freq), а в нижней — таблица значений затухания, определенных для конкретных частот. Значения неравномерности в полосе пропускания и затухания на частоте среза оставим без изменения. В таблицу в столбец Frequency введем значения частоты автогенератора, а также частоты его третьей и четвертой гармоник, которые требуется подавить с помощью фильтра, значение затухания установим на -50 дБ.

В нижней части окна появится значение Required Order, а также 3dB Lower Frequency и 3dB Upper Frequency, как показано на рис. 4.7. Требуется фильтр 3-го порядка (округляем до целого в верхнюю сторону).

Закроем окно, нажав на кнопку ОК. В окне настроек проверим входное сопротивление фильтра, равное 50 Ом, а также частоты и расчетный порядок фильтра. Пример окна показан на рис. 4.8.

Estimate Order

Enter passband and attenuation requirements below. The filter order will be estimated based on the requirements entered and displayed in the Output window below.

Type: Bandpass OK

Shape: Chebyshev all pole Help Cancel

Variable	Value
Passband Ripple (dB)	0.25
Cutoff Attenuation (dB)	0.25
Lower Cutoff Freq (MHz)	19
Upper Cutoff Freq (MHz)	21

	Frequency	Attenuation
1	10	-50
2	30	-50
3	40	-50
4		

Output

Required Order = 2.796276
 3dB Lower Frequency = 18.761350
 3dB Upper Frequency = 21.267126

Рис. 4.7. Определение порядка фильтра

Filter Properties

Topology Settings Defaults G Values Summary

Input Resistance	50
Low Freq Cutoff (MHz)	19
High Freq Cutoff (MHz)	21
Order	3
Passband Ripple (dB)	0.25
Attenuation at Cutoff (dB)	0.25

☒ Auto Adjust Frequency Range Estimate Order...

Issues

Variable range is 1 to 21.
 Warning: Bandwidth of 10% is < 30%, consider coupled types.
 Output Resistance = 50.000000

Reposition Windows Revert

Рис. 4.8. Окно параметров фильтра

В окне BF_Design показана схема получившегося фильтра, а в окне BF_Response — параметры S_{21} , дБ и S_{11} , дБ. Примеры окон показаны на рис. 4.9 и 4.10 соответственно.

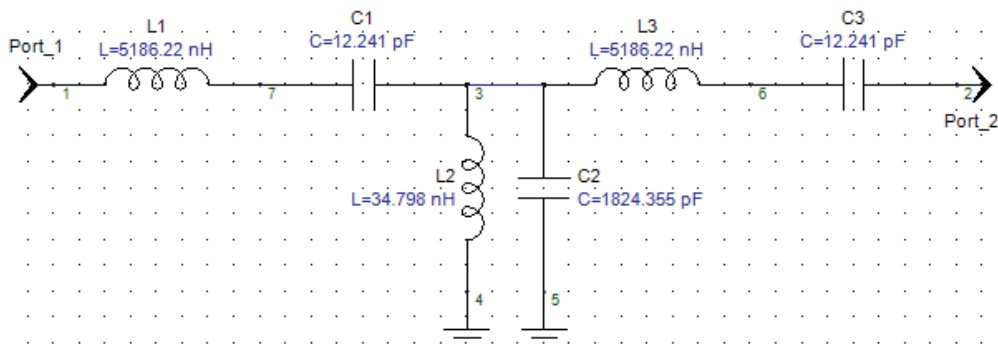


Рис. 4.9. Окно схемы фильтра

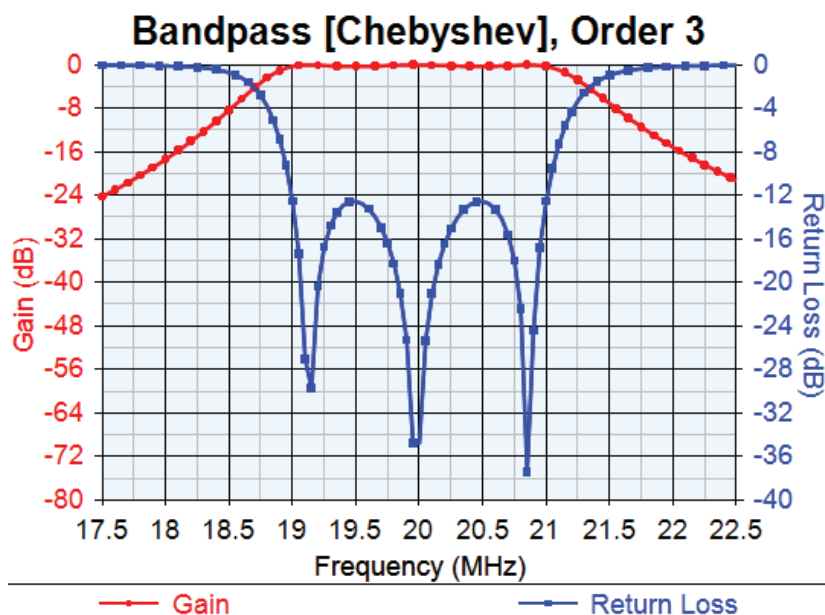


Рис. 4.10. Окно характеристик фильтра

Изменим диапазон линейного анализа фильтра так, чтобы в него попала третья гармоника автогенератора. Проверим подавление на гармониках, добавив маркеры на график. Подберем стандартные значения (E24) для элементов фильтра, контролируя подавление гармоник на графике (рис. 4.11).

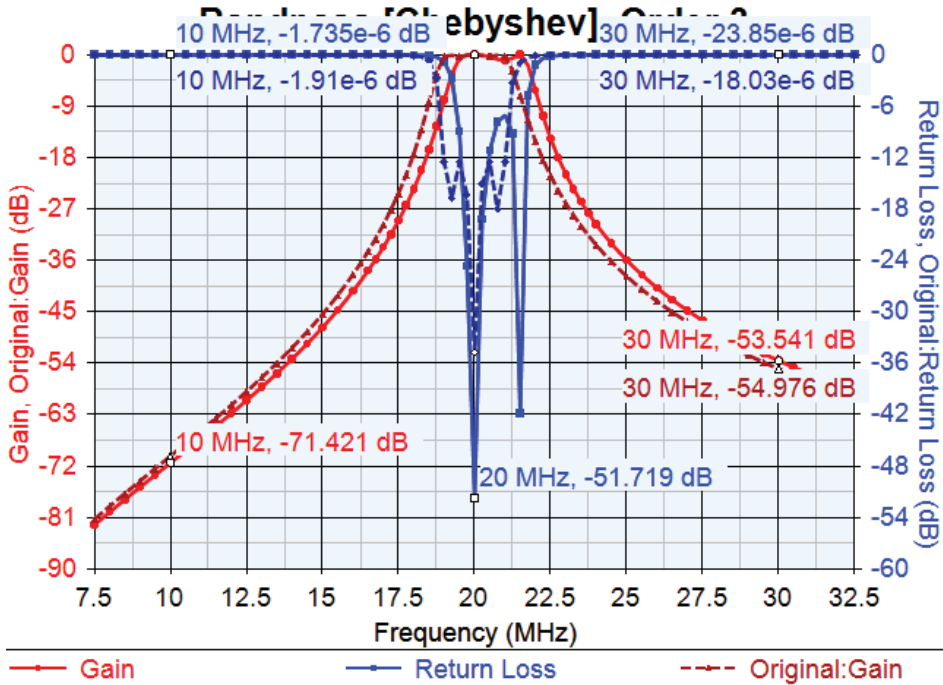


Рис. 4.11. Характеристики фильтра после выбора стандартных значений

Подключим полученный фильтр на выход умножителя перед выходным портом так, как показано на рис. 4.12.

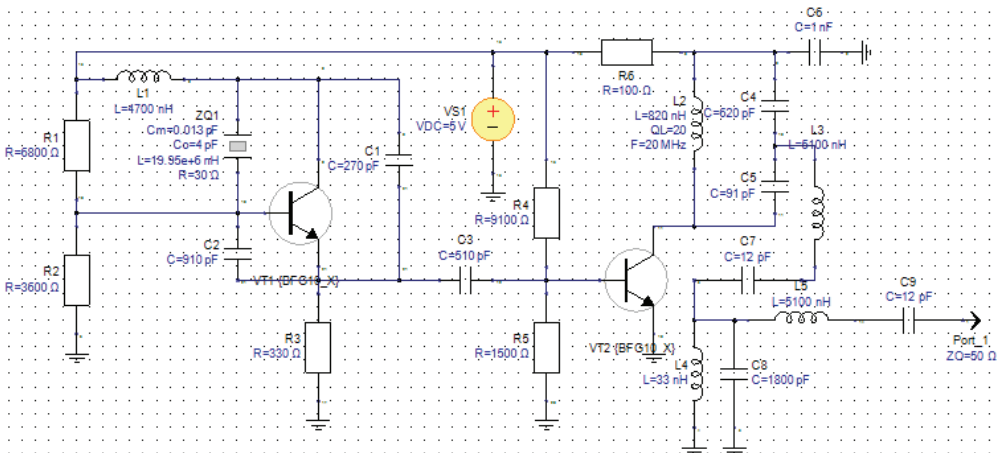


Рис. 4.12. Подключение фильтра на выход умножителя

Запустим временной анализ полученной схемы и дождемся его окончания. Проверим спектр сигнала на выходе возбуждителя (рис. 4.13).

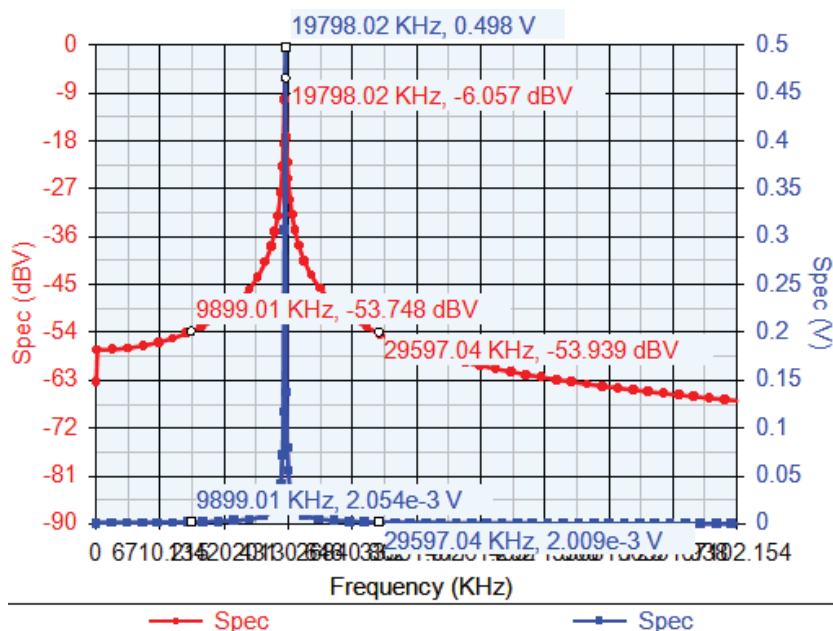


Рис. 4.13. Спектр сигнала на выходе возбуждителя

4.3. Разработка печатной платы возбуждителя

Создадим топологию печатной платы возбуждителя на основе полученной схемы. Для этого необходимо назначить всем элементам соответствующий footprint — контур (рисунок контактной площадки поверхностного монтажа). Выберем резистор (например, R1) и откроем его Properties через всплывающее меню или нажав Enter на клавиатуре (рис. 4.14).

Нажмем кнопку Advanced Options и выберем закладку Layout. Нажмем на кнопку Change Footprint и выберем из библиотеки SM782. L1B элемент RC3216 — чип-резистор с габаритными размерами 1206 (рис. 4.15).

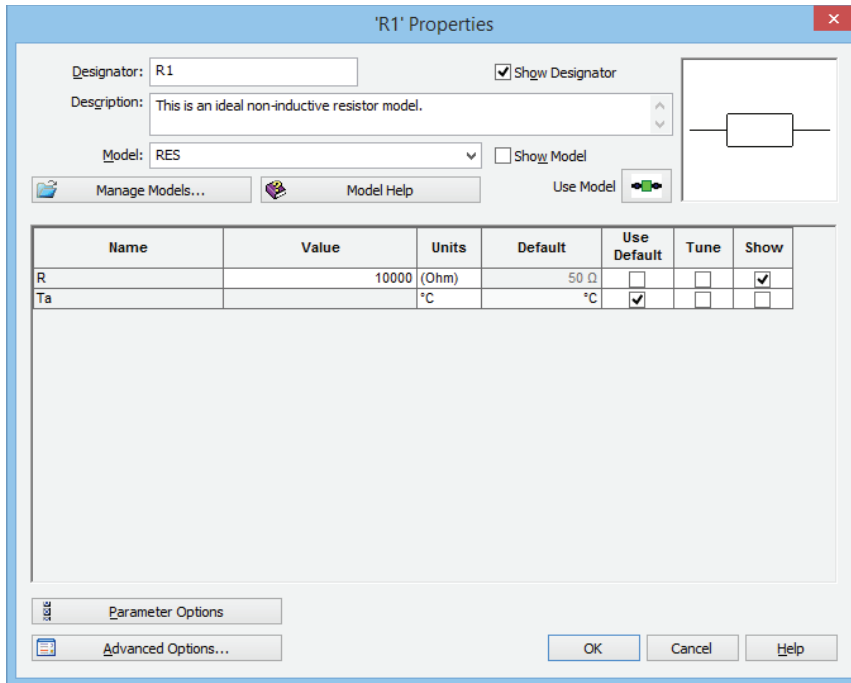


Рис. 4.14. Свойства резистора

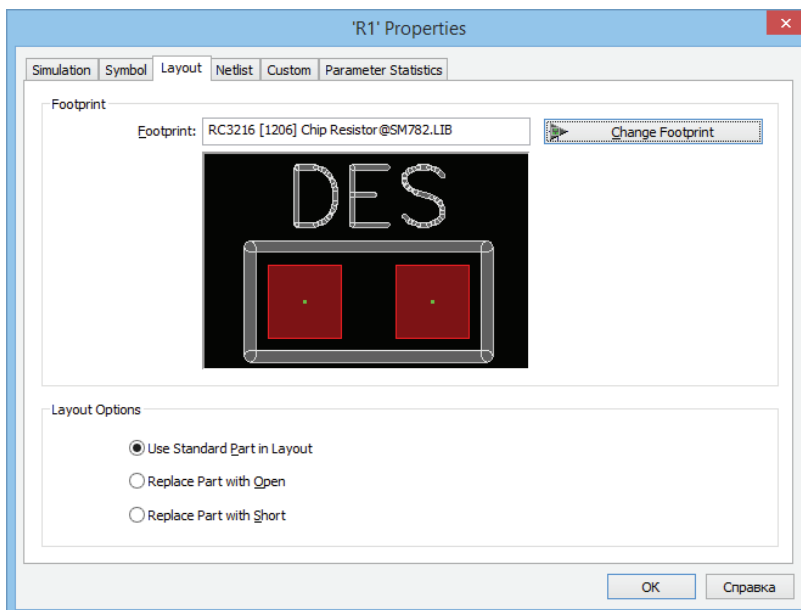


Рис. 4.15. Выбор топологии

В центральной части отобразится внешняя граница чип-резистора (серая) и две контактные площадки (красные), с которыми соединяются проводники печатной платы. Нажмем ОК и закроем свойства резистора.

Аналогично установим контуры для остальных резисторов.

Можно выбрать несколько элементов, но свойства изменяются отдельно для каждого.

Затем установим контуры такого же размера для керамических чип-конденсаторов (CC3216) и чип-индуктивностей (LC3216). Для транзисторов используем контур SOT23. Для кварцевого резонатора установим контур HC49 из библиотеки LEADED.LIB. Источник питания подключим через контакты POST1x2 из той же библиотеки.

Печатная плата двусторонняя, нижний слой сделаем общим, земляным. Поэтому каждый символ заземления на плате будет преобразован в сквозное отверстие (via), через которое цепь будет подключаться к нижнему слою. Чтобы не создавать лишних отверстий на схеме, можно объединить у близко расположенных элементов контакты, подключенные к земле.

Щелкнем второй кнопкой мыши на закладке под схемой и выберем пункт Add Layout (рис. 4.16).

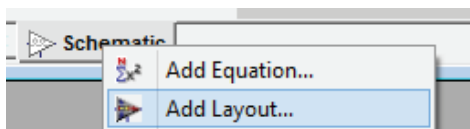


Рис. 4.16. Добавление топологии печатной платы

Программа создаст контур печатной платы и добавит компоненты, соединенные в соответствии с электрической принципиальной схемой (рис. 4.17).

Если контуры и обозначения компонентов не отображаются, следует выбрать во всплывающем меню пункт Show/Hide Layers и включить все слои. Элементы должны быть размещены в пределах контура печатной платы. Соединения отображаются серыми линиями, которые необходимо заменить печатными проводниками.

Проверим настройки печатной платы. Для этого выберем пункт Layout Properties во всплывающем меню. Программа отобразит окно свойств, в котором необходимо установить единицы измерения (mm) и размеры проводников, отверстий, сетки и контуры печатной платы в соответствии с рис. 4.18.

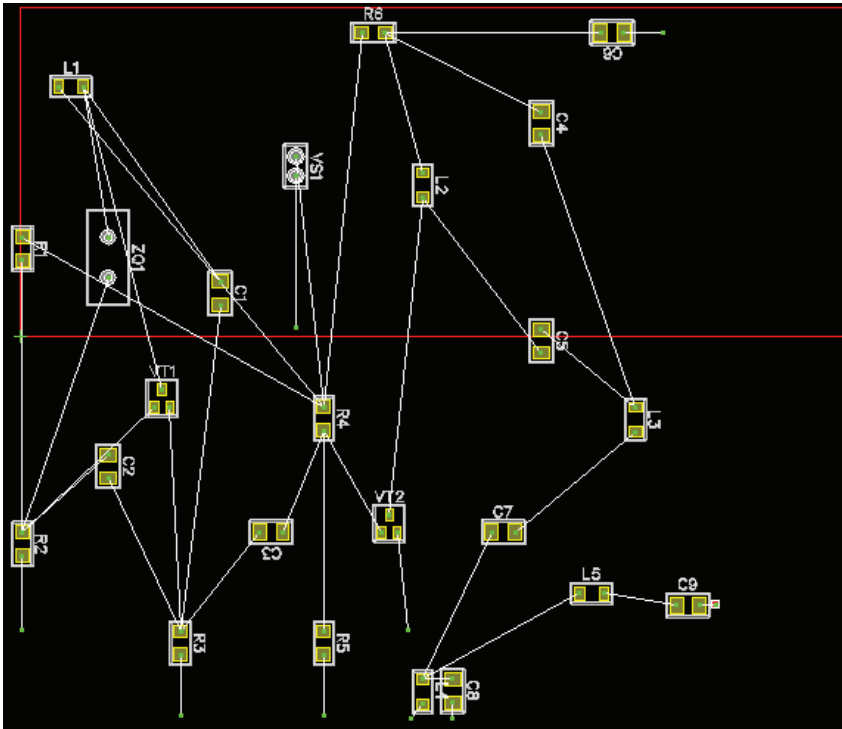


Рис. 4.17. Созданная программой топология печатной платы

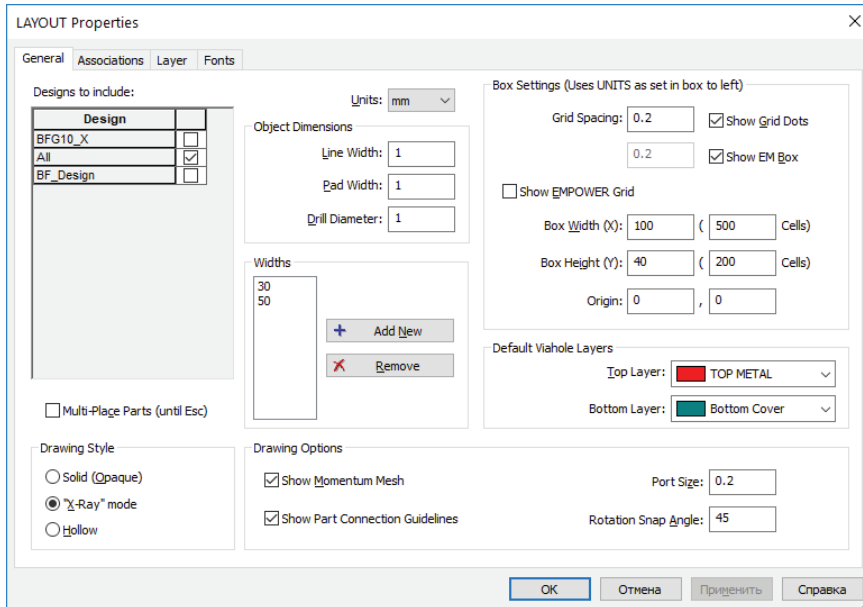


Рис. 4.18. Свойства печатной платы

Если размеры обозначений элементов слишком велики, можно изменить размер шрифта на последней закладке свойств. Для удобства работы с платой можно добавить дополнительное окно со схемой командой меню Window—New Window и расположить его рядом с окном печатной платы.

Расположим элементы на печатной плате и соединим их проводниками. Для соединения нажмем L (линия) и протянем линию от вывода одного элемента к связанному выводу другого. При соединении серая линия исчезнет. Если получилась наклонная линия, то используя клавиши O (добавление ортогональной линии) и F (переворот линии) можно преобразовать ее в две ортогональные.

Для подключения к обратной стороне точек заземления нажмем V (переходное отверстие) и поместим его в нужном месте. Контакты питания и выходной порт разместим у края платы. Получится плата с соединенными элементами, подобная приведенной на рис. 4.19.

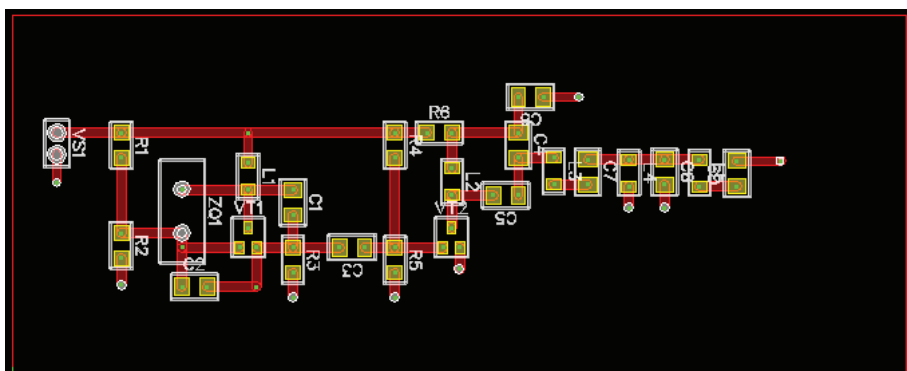


Рис. 4.19. Печатная плата с соединенными элементами

4.4. Контрольные вопросы

1. Для какой цели используется возбуждитель частоты?
2. Каким должен быть коэффициент подавления по существующим нормам?
3. Какой порядок нумерации элементов схемы?
4. Зачем нужен фильтр на выходе умножителя?
5. Зачем необходимо назначить всем элементам схемы соответствующий footprint — контур?
6. Почему нижний слой платы сделан общим?

Список библиографических ССЫЛОК

1. Keysight Technologies сайт разработчика программного обеспечения: Программа Genesys для проектирования ВЧ / СВЧ устройств. URL: <https://www.keysight.com/main/software.jsp?id=2216771&cc=RU&lc=rus> (дата обращения: 28.05.2020).
2. Алексеев О. В., Грошев Г. А., Чавка Г. Г. Многоканальные частотно-разделительные устройства и их применение. М. : Радио и связь, 1985. 200 с.
3. ГОСТ 52023–2003. Сети распределительные систем кабельного телевидения Основные параметры. Технические требования. Методы измерений и испытаний. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200031637> (дата обращения: 28.08.2019).
4. Ханзел Г. Е. Справочник по расчету фильтров. М. : Сов. радио, 1974. 288 с.
5. Генерирование колебаний и формирование радиосигналов: учеб. пособие / В. Н. Кулешов [и др.]. М. : Издательский дом МЭИ, 2008. 416 с.
6. Ворона В. А. Радиопередающие устройства. Основы теории и расчета: учеб. пособие для вузов. М. : Горячая линия — Телеком, 2007. 384 с.
7. Гарматюк С. С. Задачник по устройствам генерирования и формирования радиосигналов : учеб. пособие для вузов. М. : ДМК Пресс, 2012. 672 с.
8. Проектирование транзисторных каскадов передатчиков: учеб. пособие для техникумов / М. С. Шумилин [и др.]. М. : Радио и связь, 1987. 320 с.

Словарь

- 3dB Lower Frequency** — Нижняя частота среза по уровню 3 дБ
- 3dB Upper Frequency** — Верхняя частота среза по уровню 3 дБ
- Add** — Добавить
- Add-Designs-Schematic** — Добавить-Чертеж-Принципиальную схему
- Add Equation** — Добавить Уравнение
- Add-Evaluations-Optimization** — Добавить-Оценку-Оптимизацию
- Add-Evaluations-Sweep** — Добавить-Оценку-Развертку
- Add Function** — Добавить Функцию
- Add Layout** — Добавить Топологию
- Add New Graph/Table** — Добавить новый График/Таблицу
- Add-Syntheses-Passive Filter** — Добавить-Синтез-Пассивного фильтра
- Advanced Options** — Расширенные опции
- Bandpass** — Полосовой
- Change Footprint** — Поменять посадочное место
- Change Symbol** — Поменять символ
- Checkpoint graphs and save Tune State** — Сохранить контрольную точку графика
- Convert to Subcircuit** — Преобразовать в подсхему
- Controlled by Truncation Error (Approximate)** — Контролируется ошибкой округления (Аппроксимация)
- Create Custom Symbol** — Создать свой символ
- Current Library** — Текущая библиотека
- Cutoff Attenuation** — Затухание в полосе задержания
- Designator** — Обозначение
- Designs** — Чертежи

Edit Equations — Редактировать Уравнения
Estimate Order — Вычислить порядок
EndOpt — Окончание оптимизации
Equation — Уравнения
Export — Экспорт
Factory Default Values — Значения по умолчанию
Frequency — Частота
Frequency Range — Частотный диапазон
Get Tuned Variables — Получить настраиваемые переменные
Goal — Цель
Help oscillator start — Помочь старту автогенератора
Help-Topics and Index — Помощь-Разделы и указатель
HF — ВЧ
Import-Circuit Files-SPICE File — Импорт-Файлы схем-Файл SPICE
Import-XML File — Импорт Файла с расширением XML
Input: Custom Voltage Waveform — Входной порт: Произвольная форма напряжения
Integration/Time step — Совместимость/Временной шаг
Layout — Топология
Layout Properties — Настройки Топологии
LF — НЧ
Linear Analysis — Линейный анализ
Lower Cutoff Freq — Нижняя частота среза
Maximum Step Size — Максимальный размер шага
Method — Способ
Minimum Capacitor — Минимум конденсаторов
On Right — Справа
Original — Исходный
Output/Miscellaneous — Вывод/Разное
Output Start Time — Начальное время отображения результатов
Output Step Size — Временной шаг выдачи результатов
Passband Ripple — Неравномерность в полосе пропускания
Passive Filter — Пассивный фильтр
Remove all graph checkpoints — Удаление всех контрольных точек графика

- Rename** — Переименовать
- Required Order** — Требуемый порядок
- Run Analyses** — Провести анализы
- Run Equation** — Рассчитать Уравнения
- Save** — Сохранить
- Schematic-Make Components Tunable** — Принципиальная схема-Сделать компоненты настраиваемыми
- Schematic-Reapply Auto-designators** — Принципиальная схема-Пере назначить автоматическую нумерацию
- Select a saved Tune State** — Выбрать сохраненное состояние настройки
- Settings** — Настройки
- Shape** — Форма
- Show** — Показывать
- Show/Hide Layers** — Показать/Скрыть слои
- Spectrum** — Спектр
- Standard Values** — Стандартные значения
- Step Size** — Размер шага
- Stop time** — Время окончания
- Subtype** — Подтип
- Symbol** — Символ
- Transient** — Переходный
- Tune** — Настройка
- Type** — Тип
- Upper Cutoff Freq** — Верхняя частота среза
- Units** — Единицы измерения
- Value** — Значение
- Variable** — Переменная
- Variables** — Переменные
- View-Design Variables** — Отображение-Переменных проекта
- View-Workspace Variables** — Отображение-Переменных рабочего пространства
- Window-New Window** — Окно-Новое окно
- Workspace Variables** — Переменные рабочего пространства

Приложение 1

Варианты данных для расчета
и содержание отчетов исследования

До начала выполнения практической работы необходимо получить у преподавателя номер задания и занести его в отчет. Отчет оформляется по окончании выполнения работ и сдается преподавателю. Частоту автогенератора, тип транзистора и напряжение на нем выпишите из таблицы П1.1.

Таблица П1.1

Варианты автогенераторов

№	f , МГц	$E_{кэ}$, В	Транзистор	№	f , МГц	$E_{кэ}$, В	Транзистор
1	10	5	BFG10	16	15	5	BFG67
2	10	5	BFG11	17	15	7	PMBT2369
3	10	5	BFG16A	18	15	9	PMST2369
4	11	5	BFQ17	19	16	9	BFG10
5	11	5	BFG540	20	16	10	BFG11
6	11	5	BFG541	21	16	10	BFG16A
7	12	5	BFG67	22	17	9	BFQ17
8	12	5	PMBT2369	23	17	9	BFG540
9	12	5	PMST2369	24	17	10	BFG541
10	13	7	BFG11	25	18	5	PMBT2369
11	13	9	BFG16A	26	18	7	PMST2369
12	13	10	BFQ17	27	18	7	BFG10
13	14	7	BFG10	28	19	10	BFG11
14	14	7	BFG540	29	19	10	BFG16A
15	14	9	BFG541	30	19	10	BFQ17

Справочные параметры транзисторов приведены в таблице П1.2. Отметим, что крутизна и сопротивление насыщения зависят от токов

через транзистор, поэтому их определяют по характеристикам, построив в программе тестовую схему.

Таблица П1.2

Параметры транзисторов

Транзистор	BFG10	BFG11	BFG16A	BFQ17	BFG540	BFG541	BFG67	PMBT2369	PMST2369
r_b , Ом	3,5	1,7	2	2	5	5	10	35	0,5
r_{ε} , Ом	0,22	0,06	0,05	0,05	0,35	0,35	0,65	0,73	0,61
$I_{к доп}$, А	0,25	0,5	0,15	0,3	0,12	0,12	0,05	0,3	0,3
$U_{к доп}$, В	20	20	25	40	15	15	10	15	15
$P_{к доп}$, Вт	0,4	0,4	1	1	0,4	0,65	0,38	0,25	0,2

Содержание отчета по исследованию автогенератора

1. Исходные данные варианта.
2. Схема определения параметров транзистора. График выходной характеристики транзистора. Выбранные и полученные по графику значения сопротивления насыщения и коэффициента усиления транзистора.
3. Исходная схема с рассчитанными элементами. График самовозбуждения автогенератора. Форма и спектр колебаний в стационарном режиме.
4. Таблица с результатами анализа параметров автогенератора с пятью комбинациями параметров.

K	G	U_1	U_2	U_1/U_2

5. Схема со стандартными элементами. График спектра окончательной схемы.
6. В отчете необходимо проанализировать спектр получившейся схемы и оценить, как переход к стандартным номиналам изменяет выходной сигнал.
7. Выводы и замечания по работе.

Содержание отчета по исследованию умножителя частоты

1. Исходные данные варианта.
2. Исходная схема с рассчитанными элементами. Выбранное характеристическое сопротивление контура и график выходного спектра.

3. График формы импульсов тока коллектора и определенный угол отсечки.
4. Окончательный ток коллектора. Схема со стандартными элементами. График спектра окончательной схемы.
5. Выводы и замечания по работе.

Содержание отчета по разработке возбудителя частоты

1. Исходные данные варианта.
2. Исходная схема и график ее спектра.
3. Схема с фильтром и график ее спектра.
4. Топология печатной платы.
5. Выводы и замечания по работе.

Приложение 2

Пример выражений расчетов автогенератора

% Исходные данные

% Вариант № 0

Fr=10 % Частота в МГц

Eke=4

% транзистор BFG10

h21e=66

rb=3.5

re=0.22

lkdop=0.25

Ukdop=20

Pkdop=0.4

% Расчет

% по постоянному току

% выбор значений

Ik0=3e-3 % ток коллектора (2 ...5)mA

Ee=1 % напряжение эмиттера (1 ...3)V

Ep=Eke+Ee

Ib0=Ik0/h21e

Ie0=Ib0+Ik0

Re=round (Ee/Ie0)

Idl=10*Ib0

R1=round ((Ep-Ee-0.7)/(Idl+Ib0))

R2=round ((Ee+0.7)/Idl)

% Расчет

% по переменному току

% параметры КР

C0=4 % pF

Cm=0.0127 % pF

Lm=1/(Omega (Fr)^2*Cm*1e-12)*1e9 % nH


```

Rm=30 % Om
% выбор значений
K=0.3 % (0.2 ... 1) коэффициент обратной связи
G=4 % (3 4 5) фактор регенерации
if G==3
    Alf0=0.27
    Alf1=0.45
elseif G==4
    Alf0=0.24
    Alf1=0.42
else G==5
    Alf0=0.22
    Alf1=0.39
end
S=h21e/(rb+ (h21e*0.026/lk0)+ (1+h21e)*re)
x1=sqrt (G*Rm/(S*K))
x2=x1*K
C1=round (1/(Omega (Fr)*x1)*1e12) % pF
C2=round (1/(Omega (Fr)*x2)*1e12) % pF
C3=round (10/(Omega (Fr)*Re)*1e12) % pF
Lk=round (5*x1/Omega (Fr)*1e9) % nH

% энергетический расчет
lkmax=lk0/Alf0
if lkmax>lkdop
    warning ('lk>dop')
end
lk1=Alf1*lkmax
Ub=lk1*G/S
Uk=Ub*sqrt (x1^2+Rm^2)/x2
if (Eke+Uk)>Ukdop
    warning ('Uk>dop')
end
Pkv=0.5* (Ub/x2)^2*Rm
if Pkv>0.002
    warning ('Pkv>dop')
end
P0=lk0*Eke
Pk=P0-Pkv
if Pk>Pk Dop
    warning ('Pk>dop')
end

```

Приложение 3

Извлечение данных входного сигнала умножителя

```
using ('Transient1_Osc_Data') % используем выходные данные автогенератора
VOsc=V1 % извлекаем форму сигнала
TOsc=T-T (1) % и время, сдвигая к 0
setindp ('VOsc','TOsc')
```

Приложение 4

Пример выражений расчетов удвоителя

```
% Исходные данные
% Вариант № 0
Fr=10 % входная частота в МГц
Fr2=Fr*2 % выходная частота в МГц
Ep=5
Ik0=3e-3 % ток коллектора (2 ...5)mA
```

```
% транзистор BFG10
h21e=66
rns=7.5
rb=3.5
re=0.22
Ikdp=0.25
Ukdp=20
Pkdop=0.4
```

```
% расчет коллекторной цепи
Teta=60
Alf0=0.218
Alf2=0.276
Ikmax=Ik0/Alf0
if (Ikmax)>Ikdp
warning ('Ik>dop')
end
Ik2=Ikmax*Alf2
Ek=Ep-100*Ik0
Uk2=Ek-Ikmax*rns
if (Ek+Uk2)>Ukdp
warning ('Uk>dop')
end
P0=Ek*Ik0
```

$P2=0.5 \cdot I_{k2} \cdot U_{k2}$

$P_s = P_0 - P_2$

if (P_s) > P_{kdop}

warning (' $P_k > dop$ ')

end

% расчет нагрузки

$R_k = U_{k2} / I_{k2}$

$Q_L = 1 \cdot Fr_2$ % добротность

$r_o = 100$ % характеристическое сопротивление

$L_1 = \text{round}(r_o / \Omega \cdot (Fr_2)^2 \cdot 1e9)$ % нГ

$C_k = 1 / (\Omega \cdot (Fr_2)^2 \cdot L_1 \cdot (1 + 1 / (Q_L^2))) \cdot 1e-9$

$R_x = r_o / Q_L \cdot (1 + Q_L^2)$

$R_{vn} = R_k \cdot R_x / (R_x - R_k)$

$Q_{vn} = \Omega \cdot (Fr_2) \cdot C_k \cdot R_{vn}$

$r_{vn} = R_{vn} / ((1 + Q_{vn}^2))$

$R_n = 50$ % выходное сопротивление

$Q_n = \sqrt{R_n / r_{vn} - 1}$

$C_2 = \text{round}(Q_n / (\Omega \cdot (Fr_2) \cdot R_n) \cdot 1e12)$ % пФ

$C_3 = \text{round}((1 / (\Omega \cdot (Fr_2) \cdot r_{vn} \cdot (Q_{vn} - Q_n))) \cdot 1e12)$ % пФ

$C_4 = \text{round}(100 / (\Omega \cdot (Fr_2) \cdot R_k) \cdot 1e9)$ % нФ

% расчет входной цепи

$S = h_{21e} / (r_b + (h_{21e} \cdot 0.026 / I_{k0}) + (1 + h_{21e}) \cdot r_e)$

$U_b = I_{kmax} / (S \cdot (1 - \cosd(Teta)))$

$E_b = 0.7 \cdot U_b \cdot \cosd(Teta)$

$I_{b0} = I_{k0} / h_{21e}$

% входной делитель

$I_{del} = 10 \cdot I_{b0}$

$R_1 = \text{round}((E_p - E_b) / (I_{del} + I_{b0}))$

$R_2 = \text{round}(E_b / I_{del})$

Учебное издание

Гусев Борис Владимирович
Лагунов Евгений Владимирович
Чечёткин Виктор Алексеевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ В СРЕДЕ GENESYS

Редактор *И. Ю. Плотникова*
Компьютерный набор *Е. В. Лагунова*
Верстка *Е. В. Ровнушкиной*

Подписано в печать 18.06.2020. Формат 70×100 1/16.
Бумага писчая. Офсетная печать. Усл. печ. л. 8,4.
Уч.-изд. л. 4,8. Тираж 30 экз. Заказ 143.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@ustu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
E-mail: press-urfu@mail.ru



ГУСЕВ БОРИС ВЛАДИМИРОВИЧ

Кандидат технических наук, доцент.

Научные интересы: синтез цепей связи для усилителей, широкополосные усилители, феррозондовая дефектоскопия.



ЛАГУНОВ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

Кандидат технических наук, доцент департамента радиоэлектроники и связи.

Научные интересы: радиозонды, авиационная метеорология, радиопередатчики.



ЧЕЧЁТКИН ВИКТОР АЛЕКСЕЕВИЧ

Младший научный сотрудник, старший преподаватель департамента радиоэлектроники и связи.

Научные интересы: антенны, расположенные на криволинейных поверхностях, автоматизированное проектирование в радиоэлектронике.